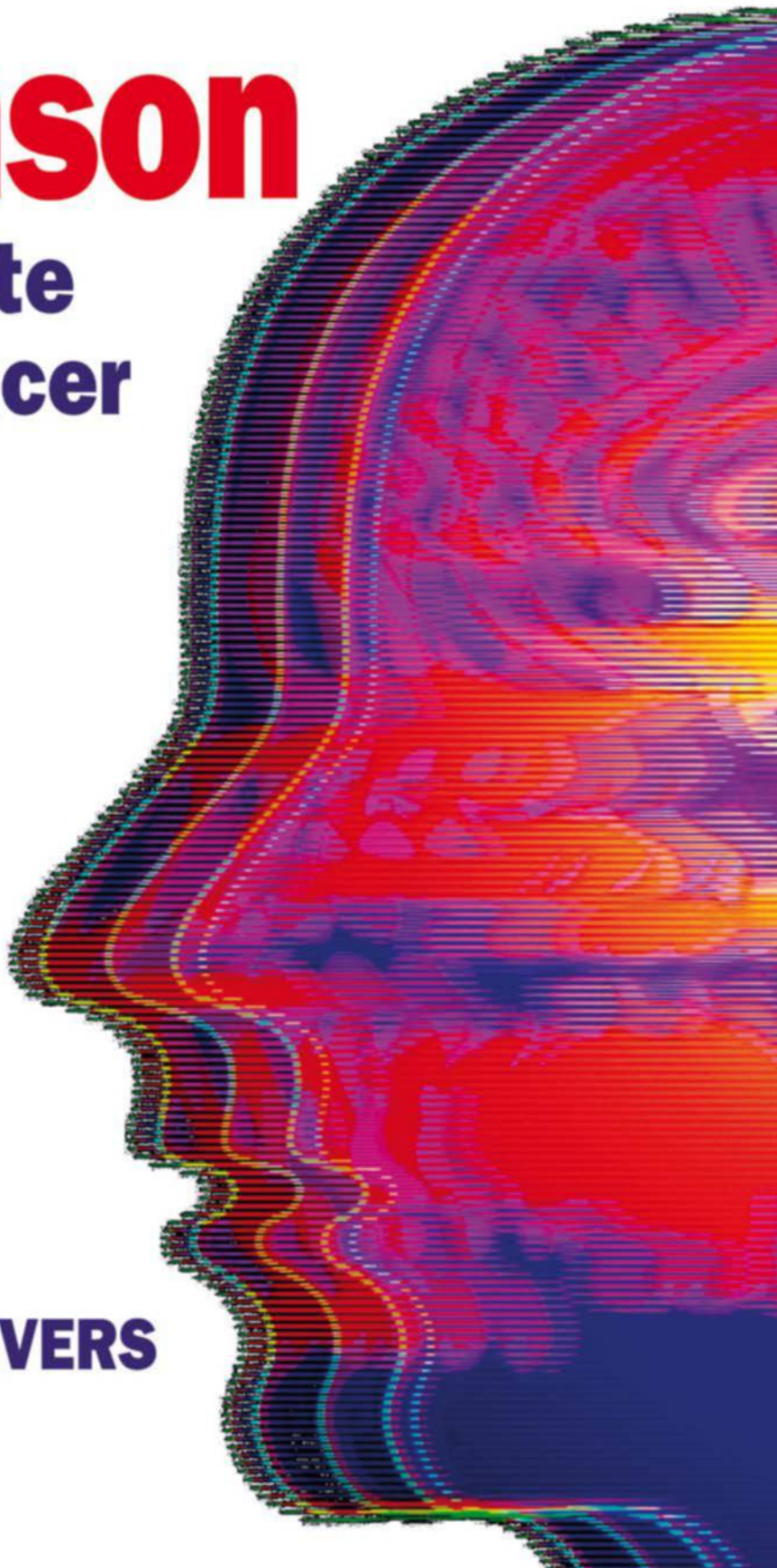
N°503 - SEPTEMBRE 2015

LA Recherche

L'actualité des sciences

Parkinson

La découverte qui fait avancer la thérapie



SPÉCIAL COP21

CLIMAT

Comment sauver les forêts

Astrophysique

ON A DÉTECTÉ LES PREMIÈRES ÉTOILES DE L'UNIVERS

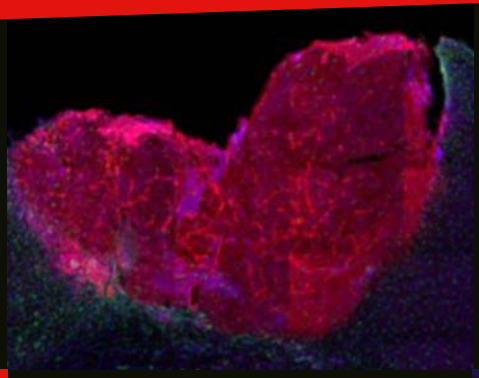
MENSUEL DOM 7,40 € - BEL 7,40 € - LUX 7,40 € - ALL 8,20 € - ESP 7,40 € - GR 7,40 € - ITA 7,40 € - PORT.CONT 7,40 € - CAN 10,5 $ CAN - CH 12,40 FS - MAR 63 DH - TUN 6,50 TND - MAYOTTE 8,80 € - TOM SURFACE 970 XPF - TOM AVION 1 620 XPF - ISSN 00295671

M 01108 - 503 - F: 6,40 € - RD

santé
en questions

Conférences citoyennes

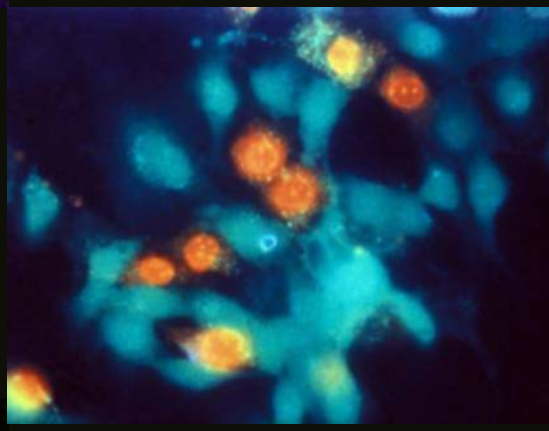
Jeudi 24 septembre
Greffes



Entrée gratuite

Programme 2015

Jeudi 15 octobre
Sclérose en plaques



Jeudi 26 novembre
Conquête spatiale et santé

Pour en savoir plus : **www.inserm.fr**
www.cite-sciences.fr/citedelasante

Inserm

cité des sciences & de l'industrie

LA Recherche

Sophia Publications
8, rue d'Aboukir 75002 Paris
Tél. : 01 70 98 19 19
e-mail rédaction : courrier@larecherche.fr
Pour joindre directement par téléphone un membre de la rédaction, composez le 01 70 98, suivi des quatre chiffres placés après son nom. Par mail, libellez l'adresse sur le modèle : initiale du prénom suivi du nom@sophiapublications.fr (sans accents).

La Recherche est publiée par **Sophia Publications,** filiale de Sophia Communications.
Président directeur-général et directeur de la publication
Thierry Verret
Directeur éditorial
Maurice Szafran
Directeur délégué
Jean-Claude Rossignol
Secrétaire général
Louis Perdriel
Assistante de direction
Gabrielle Monrose (19 06)

ABONNEMENTS
Tarif France :
1 an 10 nos + 1 n° double 67 €
1 an 10 nos + 1 n° double + 4 hors-séries 89 €
Tarif international : nous contacter.
Tél. : 01 55 56 71 15
00 (33) 1 55 56 71 15
E-mail : abo.recherche@biwing.fr
Adresse : Service abonnements La Recherche, 4 rue de Mouchy 60438 Noailles Cedex
Suisse : Edigroup
Tél. : (0041) 22 860 84 01.
Belgique : Edigroup
Tél. : (0032) 70 233 304
Achat de revues et d'écrins
La Recherche – BP65 - 24, chemin latéral 45390 Puiseaux – 02 38 33 42 89

Rédactrice en chef
Sophie Coisne
Rédactrice en chef technique
Catherine Caltaux
Assistante
Gabrielle Monrose (19 06)
Chef des informations
Philippe Pajot (19 29)
Chefs de rubrique
Hervé Cabibbo (19 30), Mathias Germain (19 33)
Rédacteurs
Gautier Cariou (19 31), Vincent Glavieux (19 32), Bérénice Robert (19 34)
Conception de la couverture
Dominique Pasquet
1re rédactrice graphiste
Michèle Bourgeois (19 27)
Service photo
Claire Balladur (19 41)
Secrétaire de rédaction
Véronique Fuvel (19 36)

Ont collaboré à ce numéro
Antoine Cappelle, Anaëlle Bruyand, Maryvonne Marconville Thibault Panis
---
Responsable fabrication
Christophe Perrusson (19 10)
Activités numériques
Bertrand Clare (19 08)

Ressources humaines
Agnès Cavanié (19 71)

Communication
Florence Virlois (19 21)

Directeur des ventes et promotion
Valéry-Sébastien Sourieau (19 11)
Vente messageries VIP-diffusion **Frédéric Vinot numéro vert 0800 51 49 74**
Responsable gestion abonnements
Isabelle Parez (19 12)
Responsable du marketing direct
Linda Pain (19 14)

Responsable comptabilité
Sylvie Poirier
Comptabilité
Teddy Merle (19 15)

Diffusion librairies
DIF'POP'. Tél. : 01 43 62 08 07
Fax : 01 43 62 07 42

Régie publicitaire Médiaobs
Pour joindre directement une personne, composez le 01 44 88, suivi des quatre chiffres placés après son nom.
Directrice générale
Corinne Rougé
Directeur commercial
Jean-Benoît Robert
Directeur des marchés Marketing direct
Xavier Personnaz
Assistante commerciale
Marylin Raso (89 02)
Directeur du pôle Sciences
Sylvain Mortreuil (97 75)
Directrice de clientèle
Karine Grossman (89 08)

Imprimerie
G. Canale & C.,
Via Liguria 24, 10071 Borgaro (TO), Italie.
Dépôt légal à parution.

OJD PRESSE PAYANTE Diffusion Certifiée 2014

Les titres, les intertitres, les textes de présentation et les légendes sont établis par la rédaction du mensuel. La loi du 11 mars 1957 interdit les copies ou reproductions destinées à une utilisation collective. Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur, ou de ses ayants droit ou ayants cause, est illicite (article L.122-4 du Code de propriété intellectuelle). Toute copie doit avoir l'accord du Centre français du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris. Tél. : 01 44 07 47 70. Fax : 01 46 34 67 19). L'éditeur s'autorise à refuser toute insertion qui semblerait contraire aux intérêts moraux ou matériels de la publication.
Commission paritaire : 0919 K 85863. ISSN 0029-5671

Parkinson : un pas thérapeutique

PAR **Sophie Coisne**
rédactrice en chef

C'est un homme rare, s'exprimant peu dans les médias, que vous rencontrez ce mois-ci dans nos pages. Le neurochirurgien français Alim-Louis Benabid a reçu en 2014 le prix Lasker, considéré comme un tremplin vers le Nobel. Ce prix récompense des innovations médicales d'envergure. De fait, avec l'Américain Mahlon DeLong, Alim-Louis Benabid a mis au point la stimulation cérébrale profonde. Un dispositif qui soulage les symptômes d'environ 100 000 malades de Parkinson dans le monde et trouve des applications dans d'autres pathologies, telles que les troubles du comportement. Dans notre dossier consacré à la maladie de Parkinson, il nous raconte l'aventure médicale qui a conduit à cette découverte (page 26). Et nous dévoile le dispositif sur lequel ses équipes travaillent désormais : une fibre optique qui, en délivrant un rayonnement infrarouge aux neurones, les protège de la maladie. Certes, ce type de traitement n'a été testé que chez l'animal. Mais il est représentatif des idées audacieuses qui animent la communauté scientifique en lutte contre cette maladie. Une communauté très active. En juin dernier, elle a révélé rien de moins qu'un des principaux mécanismes à l'origine de cette pathologie.

© GILLEFAUCONNIER

La Recherche

N° 503
Septembre
2015

La Recherche
est publiée par
Sophia Publications,
filiale de Sophia
Communications

En couverture :
© MEHAU KULYK/SPL/
COSMOS

Offre d'abonnement : p. 57

Ce numéro comporte un encart abonnement *La Recherche* sur les exemplaires kiosque France et étranger (hors Suisse et Belgique) ; un encart abonnement Edigroup sur les exemplaires kiosque Suisse et Belgique ; un encart *National Geographic* sur les abonnés.

actualités

3 **Éditorial**

6 **Courrier**

ESO/M.KORNMESSER

8 **L'événement**
On a vu les premières étoiles de l'Univers

12 **Paléogénétique**
Des migrations préhistoriques confirmées par de l'ADN ancien

13 **Botanique**
Les organes d'une plante communiquent par messager chimique

14 **Chimie**
Du roseau dans les batteries

Espace
Bouclier magnétique pour vols habités

15 **Climatologie**
Fabio D'Andrea : « L'enjeu est d'améliorer les prévisions météorologiques à long terme »

16 **Santé**
La régénération des cellules du myocarde finalement révélée

Paléontologie
Un dinosaure ailé refait surface

18 **Climat**
Avec la chaleur, les précipitations s'intensifient

Physique
Nouvelle source d'isotopes pour la médecine nucléaire

19 **Astronomie**
Étonnante Pluton

20 **Informatique**
À la recherche du patient zéro

Santé
Sans abeilles, des aliments de moins bonne qualité

22 **Physique**
Deux pentaquarks découverts au LHC

Santé
Vers la production de sang universel

24 **Astrophysique**
Une toute petite exoplanète

Entomologie
Le moustique du paludisme est un agent double

25 **Politiques**
Pollution : comment réduire les coûts ?

Santé
L'épidémie de sida enrayée

www.larecherche.fr

POUR RECHERCHER
> Les archives du magazine : Trouvez les sujets qui vous intéressent dans une base de plus de 20 000 articles

POUR S'INFORMER
> L'actualité de la recherche, le blog des livres et l'agenda des manifestations scientifiques

POUR ACHETER
> Abonnement et vente d'anciens numéros
> Livres sélectionnés par *La Recherche*, outils du chercheur

La Recherche sur Twitter… Rejoignez-nous sur Twitter pour un éclairage original sur la science et les technologies **http://twitter.com/maglarecherche**

savoirs

26 **Dossier**

Trois stratégies pour vaincre Parkinson

28 Alim-Louis Benabid : « Les infrarouges redonnent de l'énergie aux neurones » Propos recueillis par Mathias Germain

34 Des mouvements sous contrôle par Mathias Germain

36 S'attaquer aux protéines folles par Anne Debroise

41 Soigner avec des gènes par Mathias Germain

CLINATEC

43 **Géophysique**

Comment reproduire le champ magnétique terrestre ?

par Denis Delbecq

48 **Environnement**

Réchauffement climatique : peut-on sauver nos forêts ?

par Ivan Scotti

53 **Santé**

Une brèche salvatrice dans le cerveau

par Anne Debroise

58 **Physique**

Quand la chaleur devient quantique

par Sylvain Guilbaud

64 **Paléontologie**

Reste-t-il des secrets de famille chez les hominidés ?

par Thibault Panis

69 **Palmarès**

11e concours Génération développement durable

par Hervé Cabibbo

73 **Biodiversité**

Dans le laboratoire de l'acidification des océans

par Elizabeth Kolbert

80 **Portrait Laurent Lévy**

« Ma pensée fonctionne comme une machine à expresso ! » par Viviane Thivent

idées

84 **L'entretien du mois**

avec Erik Brynjolfsson

« La technologie rompt le contrat social »

Propos recueillis et traduits de l'anglais par Denis Delbecq

88 **Histoire de science**

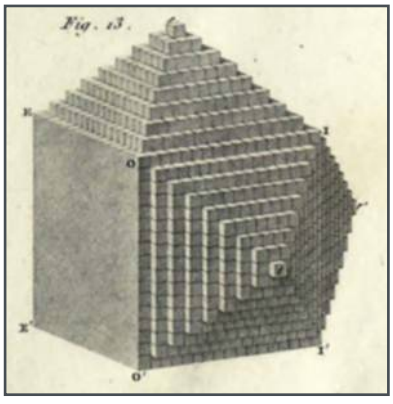
Et l'abbé Haüy créa la cristallographie

par Éric Sartori

91 **Les livres**

96 **L'agenda**

98 **Curiosités**



UNIVERSITÉ DE TORONTO

Étalon usagé

Physique

Le kilogramme : en finir avec les variations de masse

Unités de mesure cherchent étalon

L'article sur les unités de mesure (*La Recherche*, n° 499, p. 62) indique que la masse de l'étalon du kilogramme a varié au fil du temps en raison de l'usure. Vous citez Philippe Richard : « *Depuis sa création, le prototype n'a été utilisé que trois fois pour faire des mesures comparatives avec ses copies et, à chaque fois, on a constaté que la différence de masse augmentait* ». C'est totalement faux. Le choix du matériau utilisé (platine iridié), les conditions de préservation de l'étalon, la rareté des mesures pratiquées et les soins minutieux déployés lors de ces manipulations rendent toute usure impossible. La véritable raison des écarts constatés est le rattrapage de la précision de chacune de ces mesures par les progrès de la métrologie.

Courriel de Bernard Rolet

Réponse de Philippe Richard

Il est exact que le prototype international du kilogramme est largement préservé des effets éventuels d'usure. Néanmoins, sa masse ne peut pas être comparée avec une autre référence absolue car elle n'existe pas encore. Sans cette comparaison, on ne peut affirmer que la masse du prototype ne change pas avec le temps. D'ailleurs, ni les progrès de la métrologie ni le temps n'ont un effet sur la définition actuelle du kilogramme. La dérive de masse entre le prototype et ses copies est incontestable. Vous dites qu'elle ne serait pas significative par rapport à l'évolution des incertitudes de mesures, mais c'est faux : en 1889, l'incertitude de mesure de type A (statistique) pour un étalonnage à l'aide du prototype international du kilogramme était de 3,2 microgrammes, en 1946 de 5,4 microgrammes et aujourd'hui de 3,5 microgrammes. Or la dérive de 50 microgrammes observée est significative et nettement plus importante que les incertitudes de mesure autorisées. Ces éléments sont les principales motivations pour les efforts intenses en direction de la révision fondamentale du système international d'unités prévue pour 2018.

Galaxie plissée

À propos du modèle de disque externe de notre galaxie plissé (*La Recherche*, n° 499, p. 24), les astronomes Harvey Liszt et Butler Burton ont montré en 1978 qu'un disque qui se comporte comme un corps solide de 3 000 parsecs de diamètre, incliné de 27 degrés sur le plan galactique, tourne au centre de notre Galaxie. Placé dans le champ de gravitation de la galaxie voisine, ce disque est donc soumis à un mouvement de précession et de nutation qui produit un champ de gravitation variable, qui se propage. Cette onde de gravitation produit des modifications de densité des gaz qu'elle rencontre, qui conduisent à la formation d'étoiles. La précession est à l'origine des bras spirales et la nutation est à l'origine des paquets d'étoiles le long des bras. Aux bords des galaxies spirales, ces variations donnent naissance aux plissements, qui sont donc faciles à expliquer.

Courriel de Jacques Nordmann

Réponse de Nicolas Prantzos

Vous avez raison quant à l'article de Harvey Liszt et Butler Burton, mais il y a eu depuis un très grand nombre de travaux sur les sujets du bulbe galactique et des plissements externes du disque. L'origine des plissements est encore mal comprise, mais elle serait liée à l'interaction de la Voie lactée avec des galaxies externes, à travers leurs halos de matière sombre. Au début, on croyait que c'était le Grand Nuage de Magellan, plus récemment la petite galaxie proche du Sagittaire, mais aucune idée n'arrive à satisfaire toutes les contraintes dynamiques. La formation d'étoiles par paquets le long des bras est un effet fréquemment observé dans les galaxies spirales, lié à des instabilités diverses, sans rapport avec ce qui se passe dans les régions centrales ou d'éventuels mouvements de précession, nutation, etc.

Croyances cartographiées

Le billet de Hervé Le Bras [sur le nombre de mosquées en France, NDLR] (*La Recherche*, n° 499, p. 82) laisse une impression de malaise par l'application d'une simple règle de trois à ce que les hommes ont de plus intime : la croyance et son rapport au monde extérieur. Le raisonnement ne tient pas compte d'un sentiment qui n'a rien de religieux : la réticence vis-à-vis de l'Islam, dont sont issus les acteurs des immenses désordres au Moyen-Orient et en Afrique vis-à-vis des chrétiens. Cela jette le doute sur la pertinence d'un raisonnement qui élimine un fait politique majeur de notre début de siècle.

Courriel de Jean-Marie Thiers

Réponse de Hervé Le Bras

Votre inquiétude est compréhensible… et historique. Dans un livre consacré à la philosophie de la technologie, Gilbert Simondon en vient à une bipolarisation : l'homme sépare sa vie en technologie, pour ce qu'il peut comprendre et maîtriser, et en religion pour le reste. L'équilibre ou la frontière entre les deux est un objet permanent de litige. Dans une revue consacrée à l'explication de la science et de la technologie, il est logique de repousser la frontière, donc de limiter ou de laïciser la religion. Cela n'est pas toujours du goût de ceux qui subliment le fait religieux. Quand le chanoine Boulard a publié ses premiers comptages de la pratique religieuse en France et ses cartographies des ordinations, il a été mal reçu par sa hiérarchie. Quoi, Dieu se pliait à des facteurs historiques et géographiques pour susciter la foi et les vocations ? Mais il en est ainsi. Tout ce qui participe à la connaissance empirique, statistique, mécanique, neurologique de la religion doit être versé au progrès de la science. Je ne crierai pas « À mort l'infâme » avec Voltaire, mais je me range du côté de toute connaissance empirique de la religion, ne serait-ce que pour éviter la confusion entre Islam, islamisme, djihadisme et terrorisme.

Sauf mention contraire de leur auteur, toute lettre parvenue à la rédaction de *La Recherche* est susceptible d'être éditée et publiée, en tout ou en partie, dans le journal. Les lettres concernant un auteur extérieur à la rédaction de *La Recherche* lui sont envoyées. Sans réaction de l'auteur dans un délai raisonnable, nous les considérons comme publiables en tout ou en partie, sans attendre une éventuelle réponse de sa part. Dans la mesure du possible, évitez les fax et les lettres manuscrites.

FAIRE PLEURER UN ENFANT, ÇA PEUT LUI SAUVER LA VIE.
Un enfant meurt toutes les 7 secondes faute d'accès aux soins.
Faites un don sur makeachildcry.com
MÉDECINS DU MONDE
SOIGNE AUSSI L'INJUSTICE
DON EN CONFIANCE
© DDB

On a vu les premières étoiles de l'Univers

Dans une galaxie lointaine, située à 13 milliards d'années-lumière de la Terre, des astronomes ont observé pour la première fois la plus vieille génération d'étoiles du cosmos. PAR **Julien Bourdet,** journaliste.

ESO/M.KORNMESSER

Dans la galaxie CR7, représentée ici par une vue d'artiste, brillent des étoiles de première génération, chaudes, massives et constituées uniquement d'hydrogène et d'hélium.

Ce sont les ancêtres de toutes les étoiles qui brillent aujourd'hui dans le cosmos. Ces étoiles de première génération, formées au début de l'Univers à partir de la matière issue directement du Big Bang, et qui ont toutes disparu depuis, étaient restées jusqu'ici des objets purement théoriques. Un groupe d'astronomes vient enfin de mettre la main dessus. À 13 milliards d'années-lumière de la Terre, dans l'une des galaxies les plus lointaines jamais découvertes, l'équipe de David Sobral, de l'université de Lisbonne, au Portugal, et de l'observatoire de Leyde, aux Pays-Bas, a observé pour la première fois des représentants de ces astres primordiaux [1].

Aux yeux des astronomes, ces premières étoiles sont d'une importance capitale. D'abord parce que ce sont elles qui, en s'allumant quelques centaines de millions d'années après le Big Bang, ont fait sortir l'Univers de la période d'obscurité dans laquelle il était alors plongé [Fig. 1]. Ensuite parce que « *c'est à l'intérieur de ces astres qu'ont été fabriqués, par fusion thermonucléaire, les premiers éléments plus lourds que les seuls éléments disponibles après le Big Bang pour former*

L'essentiel

> LES ÉTOILES DE PREMIÈRE GÉNÉRATION sont des étoiles extrêmement massives – plusieurs centaines de fois la masse du Soleil –, composées d'hydrogène et d'hélium.

> LA PREMIÈRE PREUVE directe de leur existence a été obtenue par des astronomes grâce à une stratégie d'étude du ciel combinant plusieurs télescopes au sol et dans l'espace.

> LEURS TRAVAUX recèlent une autre surprise : ces étoiles se seraient formées en plusieurs vagues, et non toutes à la même période.

des étoiles : l'hydrogène, l'hélium et le lithium », explique Daniel Schaerer, l'un des auteurs de la découverte, chercheur à l'université de Genève, en Suisse, et au CNRS.

En explosant à la fin de leur vie (lire « Des explosions phénoménales », ci-dessous), ces étoiles dites de population III ont alors dispersé autour d'elles tous leurs éléments lourds – ou « métaux », comme les appellent les astronomes – qui ont ensuite été incorporés dans les générations suivantes d'étoiles : d'abord celles dites de population II (les moins métalliques, observées à la périphérie de notre galaxie), puis celles de population I (les plus riches en métaux, dont fait partie le Soleil). Ainsi, de génération en génération, le cosmos s'est enrichi de ces ingrédients sans lesquels la formation des planètes et des êtres vivants n'aurait pas été possible.

De vrais mastodontes. Selon les modèles construits par les astrophysiciens, les étoiles primordiales devaient être de véritables monstres, pesant l'équivalent de plusieurs centaines, voire d'un millier de soleils. Pourquoi ? *« Toute étoile naît de l'effondrement d'un nuage de gaz,* précise Frédéric Daigne, de l'Institut d'astrophysique de Paris. *Pour les étoiles qui se forment actuellement, ce processus est favorisé par la présence de molécules constituées d'éléments lourds tels que le carbone ou l'oxygène. En refroidissant le gaz, ils permettent à celui-ci de se contracter plus facilement. Résultat : ces astres sont de taille relativement "modeste". Mais, dans l'Univers primordial, ces éléments lourds n'existaient pas encore, si bien que les nuages de gaz ont grossi beaucoup plus avant de s'effondrer, produisant des étoiles plus massives. »*

Une fois allumées, ces géantes ont consumé leur existence par tous les bouts. Les astronomes le savent bien en effet : plus une étoile est grosse, plus elle consomme son combustible avec ardeur et plus sa durée de vie est courte. Beaucoup plus chauds, extrêmement lumineux et émettant beaucoup plus de rayons ultraviolets que le Soleil, les premiers astres n'ont ainsi vécu que quelques millions d'années, alors que notre étoile a une durée de vie de 10 milliards d'années.

Jusqu'à présent, on ne disposait que de preuves indirectes de l'existence de ces étoiles éphémères. Une première a été apportée grâce à l'observation du fond diffus extragalactique en 2005 par le satellite Spitzer [2]. Ce rayonnement infrarouge qui baigne tout l'Univers est la lumière résiduelle de l'ensemble des générations de galaxies qui sont apparues au cours de l'histoire. Les propriétés de ce rayonnement laissaient penser que ces étoiles avaient bel et bien existé.

Une autre preuve, plus importante encore, est liée à une période de l'Univers baptisée la réionisation. Celle-ci, dont l'existence a été attestée par les observations du satellite WMAP en 2003, puis en 2006 [3], a débuté quelques centaines de millions d'années après le Big Bang. Elle fait suite à l'émission du fond diffus cosmologique, première lumière de l'Univers (380 000 ans après le Big Bang). Surtout, la réionisation met fin à une très longue ère sombre durant laquelle l'Univers a été privé de toute lumière. Elle est caractérisée par l'émission d'intenses rayonnements ultraviolets qui percent ces ténèbres anciennes. Quels astres ont pu émettre de tels rayonnements ? Les premières étoiles sont de bons candidats.

Restait toutefois à observer ces étoiles directement. Les astronomes se sont lancés dans cette quête au début des années 2000. « *C'est à ce moment-là que les télescopes au sol et dans l'espace sont devenus suffisamment puissants pour détecter des galaxies extrêmement lointaines, et donc susceptibles d'abriter des étoiles de population III* », raconte Jean-Gabriel Cuby, directeur du Laboratoire d'astrophysique de Marseille. L'exercice reste ardu car la lumière de ces objets distants est très faible. Qui plus est, leur courte durée de vie rend leur détection plus compliquée encore.

Vaste sondage du ciel. Plusieurs prétendants sont toutefois identifiés. Mais leur nature est à chaque fois contestée. Dans certains cas, les astronomes détectent bien une trace d'hydrogène et d'hélium dans le spectre lumineux des galaxies, signe attendu de la présence d'étoiles primordiales. Mais ces éléments atomiques sont associés à d'autres plus lourds, signe cette fois de la présence d'étoiles moins anciennes. Et quand, dans d'autres observations, ces éléments lourds sont absents, ›››

Des explosions phénoménales

La première génération d'étoiles s'est probablement éteinte de façon spectaculaire. D'après les scénarios construits par les astronomes, l'explosion finale de ces astres géants – une supernova – aurait été cent fois plus lumineuse que celles engendrées par les étoiles actuelles. Habituellement, une supernova issue d'une étoile massive – plus de dix fois la masse du Soleil – survient quand son cœur de fer s'effondre sur lui-même puis rebondit. Pour une étoile primordiale, beaucoup plus grosse – plus de cent masses solaires –, c'est la production de paires d'électrons et de positrons qui déstabiliserait l'intérieur du mastodonte et provoquerait des explosions en cascade. Le phénomène aurait été si violent qu'il aurait conduit à la destruction totale de l'astre.

L'événement

On a vu les premières étoiles de l'Univers

›››› c'est l'hélium qui manque à l'appel.

De leur côté, des astronomes ont tenté de dénicher ces étoiles de première génération dans des régions bien plus proches de nous, au sein même de notre galaxie. Selon eux, ces astres n'étaient pas aussi massifs que les modèles le prévoient (lire « Des étoiles pas si géantes que ça ? », p. 11). Et de ce fait, ils auraient pu survivre jusqu'à nous. Mais là encore, les recherches se révèlent infructueuses.

Cette fois, les observations de David Sobral et de son équipe ne laissent pas de place au doute. La lumière capturée correspond exactement à ce que l'on attend de l'émission des étoiles de première génération : elle est composée essentiellement d'ultraviolets et elle révèle la présence d'hydrogène et d'hélium.

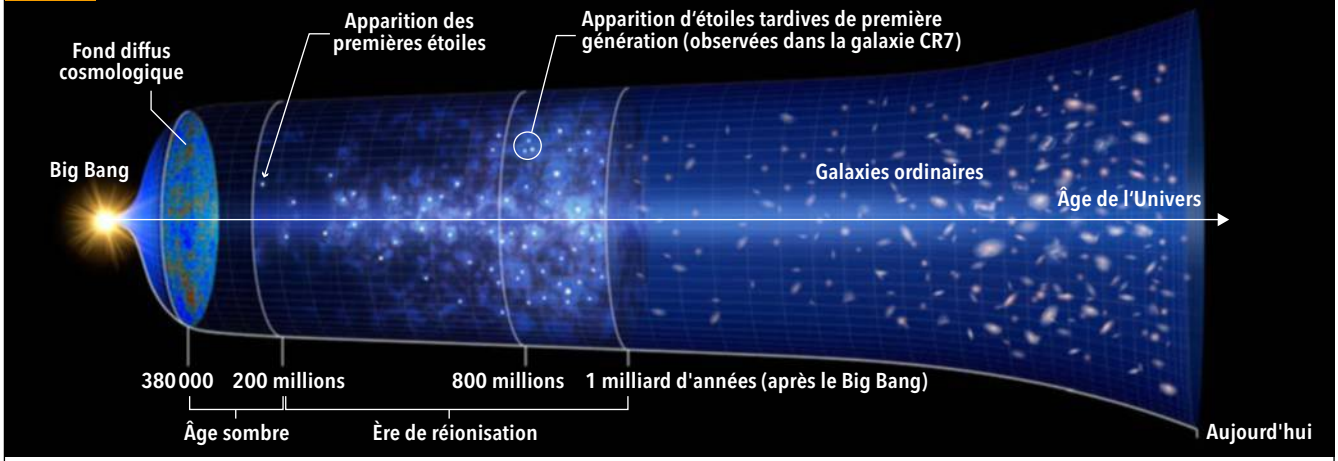
Cette découverte est due à une stratégie d'étude nouvelle. Au lieu de se concentrer sur une petite portion du ciel, l'équipe a choisi de voir large, pour produire le sondage profond le plus vaste jamais réalisé. Pour cela, elle a utilisé plusieurs télescopes au sol et dans l'espace.

Lors de ce relevé céleste, le télescope Subaru, installé à Hawaï, a d'abord permis de découvrir plusieurs galaxies très brillantes situées au fin fond du cosmos, émettant fortement dans l'ultraviolet. Parmi elles, la galaxie baptisée CR7 – un clin d'œil au footballeur portugais Cristiano Ronaldo, affublé du même surnom –, observée telle qu'elle était 800 millions d'années seulement après le Big Bang, s'est révélée de très loin la plus lumineuse. D'où le choix de l'étudier plus en détail avec le Très Grand Télescope (« VLT », Very Large Telescope) situé au Chili, le télescope Keck à Hawaï et le télescope spatial Hubble.

Ces observations révèlent alors une zone très fortement brillante dans la galaxie. Et le spectre lumineux de cette région montre la présence d'hydrogène et d'hélium ionisés. « *La présence d'hydrogène ionisé trahit l'existence d'étoiles chaudes et massives qui, en chauffant le gaz environnant, lui font émettre ces radiations. Mais il ne s'agit pas forcément d'étoiles de première génération,* commente Daniel Schaerer. *La présence d'hélium ionisé, en revanche, parce qu'elle nécessite des étoiles plus chaudes encore pour se manifester, est un argument fort pour dire qu'on a bien affaire à ce type d'astres.* »

Dernière étape : les chercheurs montrent, toujours grâce à l'étude des spectres lumineux, que cette zone où se trouvent ces étoiles est dépourvue d'éléments plus lourds que l'hélium.

Fig.1 Les premières étoiles dans l'histoire de l'Univers



LES PLUS VIEILLES ÉTOILES de première génération sont apparues près de 200 millions d'années après le Big Bang, en même temps que débutait l'ère de réionisation de l'Univers. Celles débusquées par l'équipe de David Sobral sont plus jeunes : elles sont nées 800 millions d'années après le Big Bang. INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

Le Très Grand Télescope, instrument européen situé au nord du Chili et constitué de quatre télescopes principaux et de quatre auxiliaires, a permis d'étudier en détail la galaxie CR7. ESO PHOTO AMBASSADOR BABAK TAFRESHI

Donc, dans la galaxie CR7, brillent des étoiles chaudes, massives et constituées uniquement d'hydrogène et d'hélium. En d'autres termes, des étoiles de première génération.

Des étoiles de première génération certes, mais pas forcément les premières à s'être formées dans cette galaxie. En effet, en utilisant les mêmes télescopes, l'équipe a montré également la présence d'étoiles plus froides dans d'autres zones voisines. Autrement dit, des étoiles de première génération se seraient formées dans cette galaxie dans une période plus ancienne. Ces étoiles auraient déjà explosé, permettant la formation d'étoiles plus petites. « *La première génération d'étoiles serait donc apparue par vagues successives dans la galaxie, dans différentes zones, lorsque les conditions de formation stellaire s'y trouvaient réunies* », avance Daniel Schaerer.

Si cette formation par vague était prédite par certains modèles, elle n'en reste pas moins surprenante. Jusqu'ici en effet, beaucoup d'astronomes pensaient que les étoiles de population III ne pouvaient exister que dans des galaxies plus petites, moins lumineuses et plus primitives que CR7. Car dans le scénario construit par les astrophysiciens, les premières étoiles seraient apparues au sein de galaxies de taille très modeste, ne recelant guère plus d'un million de masses solaires de matière. Par la suite, ces discrètes naines se seraient assemblées pour former des galaxies de plus en plus massives. Et le temps que ces galaxies fusionnent, les premières générations d'étoiles auraient déjà dû disparaître.

Des télescopes plus puissants. Si cette dernière découverte de l'équipe de David Sobral se confirme, cela signifierait d'une part que la matière primordiale issue du Big Bang, constituée d'hydrogène, d'hélium et de lithium, a pu rester intacte au sein des galaxies plus longtemps que ce qu'on imaginait. Et cela voudrait dire aussi que l'observation des étoiles de première génération est plus facile que prévu, ces dernières ne résidant pas uniquement au sein de petites galaxies peu brillantes difficiles à détecter – le groupe d'astronomes dit d'ailleurs avoir pris dans ses filets d'autres galaxies candidates qu'ils étudient en ce moment de très près.

Et la chasse aux premières étoiles ne fait que commencer. D'ici quelques années, des télescopes beaucoup plus puissants que ceux utilisés actuellement feront leur apparition et permettront d'observer des galaxies bien plus éloignées encore que CR7. Il y aura d'abord le télescope spatial James-Webb, le successeur du télescope Hubble, qui devrait être lancé en 2018. Puis le Télescope Géant Européen (« E-ELT », European Extremely Large Telescope) en construction actuellement au Chili et dont la mise en service du réflecteur de près de 40 mètres de diamètre est prévue vers 2025. « *Grâce à leur sensibilité hors pair, ces deux télescopes devraient être capables d'observer les toutes premières galaxies formées dans les premières centaines de millions d'années après le Big Bang et d'y déceler les toutes premières étoiles* », se réjouit Jean-Gabriel Cuby. La genèse de ces étoiles ancestrales ne devrait alors plus avoir de secrets pour les astronomes. ■

Des étoiles pas si géantes que ça ?

Et si les premières étoiles de l'Univers n'avaient pas été ces monstres de plusieurs centaines de masses solaires prédits par la plupart des modèles ? C'est ce que pensent certains astronomes, selon lesquels ces astres primordiaux ne devaient peser guère plus que 50 fois la masse du Soleil. Des simulations numériques montrent en effet que la matière à proximité d'une de ces étoiles naissantes était tellement chaude qu'une grande partie de celle-ci a échappé, en se dilatant, à la gravité de l'astre plutôt que de tomber sur ce dernier. Autre argument avancé : si les premières étoiles de l'Univers avaient été très massives, leurs descendantes directes, les étoiles les plus vieilles de notre galaxie, devraient contenir, en certaines proportions, les éléments synthétisés par ces géantes au cours de leur vie et relâchés lors de leur explosion en supernova. Or ce n'est pas ce que montrent les observations.

[1] D. Sobral *et al.*, http://arxiv.org/abs/1504.01734, 2015.
[2] A. Kashlinsky *et al.*, *Nature, 438*, 45, 2005.
[3] D. Spergel *et al.*, *Astrophys. J. Suppl., 170*, 377, 2007.

Paléogénétique

Des migrations préhistoriques confirmées par de l'ADN ancien

Une étude génomique de grande ampleur vient d'apporter de nouvelles données sur les mouvements de population à l'âge du bronze, alimentant au passage le débat sur l'origine des langues indo-européennes.

Historiens et archéologues considèrent l'âge du bronze en Europe et en Asie (de 3 000 à 1 000 avant J.-C. environ) comme une période de grands bouleversements culturels. Au début du IIIe millénaire avant notre ère, les cultures paysannes de la fin du Néolithique sont remplacées par les cultures de la céramique cordée (Cordée) en Europe centrale et d'Afanasievo en Asie centrale. Par leur perception de la famille, de la propriété et de l'individu, ces cultures sont proches de la culture Yamna – des tombes à fosse –, peuple de cavaliers-bergers ayant vécu dans la steppe au nord de la mer Noire, entre 3 000 et 2 400 avant J.-C.
Cette similarité est attestée par de nombreux vestiges archéologiques (rites funéraires, armes en cuivre, véhicules à roues, chevaux domestiqués), mais les archéologues restent divisés sur ses causes. Est-elle liée à l'influence culturelle des Yamnas sur les cultures Cordée et d'Afanasievo, ou à leur migration massive vers ces régions et au brassage génétique qui s'en serait suivi ? Une étude génétique de grande ampleur conforte cette seconde hypothèse, et relance le débat sur l'origine des langues indo-européennes [1].
En lançant un appel international à contributions, les 66 archéologues, historiens et biologistes de l'équipe ont réuni 603 échantillons datant de l'âge du bronze et provenant d'une vaste zone géographique allant de la Scandinavie au sud de l'Europe et à la Sibérie centrale.

101 génomes séquencés.
Les échantillons issus d'individus d'une vingtaine de cultures, dont les Yamnas, les cultures Cordée et d'Afanasievo, sont surtout des dents. Seuls une centaine d'échantillons ont pu être exploités « *du fait de contaminations ou de défauts de préservation* », précise Philippe Della Casa, archéologue à l'université de Zurich et membre de l'équipe. Un procédé d'extraction novateur a permis de multiplier par quatre la quantité d'ADN obtenu. Là où les études se concentrent d'ordinaire sur la couche interne de la racine dentaire, la dentine, les chercheurs ont cette fois ciblé la couche externe, plus riche en ADN, mais plus vulnérable à la contamination. L'extraction s'est faite en plusieurs étapes : un bain dans une première solution, qui a éliminé les contaminants à la surface des échantillons, puis une période d'incubation de 24 heures et, enfin, un bain

LES YAMNAS, peuple de cavaliers-bergers vivant dans la steppe au nord de la mer Noire, auraient bien migré vers l'Europe du Nord (culture Cordée) et l'Asie centrale (culture d'Afanasievo) au IIIe millénaire avant J.-C. : une étude génétique de grande ampleur vient appuyer les preuves archéologiques déjà rassemblées. © INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

dans une solution à base de silice, qui a permis d'extraire précisément l'ADN ancien. Au total, 101 génomes, de différentes zones et de différentes époques de l'âge du bronze, ont été séquencés et comparés.
Dans les génomes les plus récents issus de la zone de culture Cordée, les chercheurs ont constaté l'apparition d'allèles (des versions des gènes) propres aux Yamnas, dont celui de la tolérance au lactose. Les Yamnas auraient donc bien migré vers cette zone au cours de l'âge du bronze et se seraient reproduits avec les populations locales, entraînant un brassage génétique. La comparaison allélique est encore plus intéressante pour les Afanasievos : elle montre qu'ils sont génétiquement indistinguables des Yamnas. Là encore, ces résultats prouveraient la migration, à l'âge du bronze, d'individus de culture Yamna vers cette région.

Langue mère. Selon les auteurs, l'étude apporte également des éléments sur l'origine des langues indo-européennes. La migration des Yamnas serait cohérente avec l'hypothèse selon laquelle la langue mère inconnue, dont découleraient ces langues, aurait son origine dans la steppe caucasienne. Un propos que tempère Georges-Jean Pinault, linguiste à l'École pratique des hautes études, à Paris : « *L'expansion de telle ou telle langue n'est pas nécessairement due à un transfert massif de populations génétiquement apparentées.* » ■ **Aline Aurias**

[1] M. E. Allentoft *et al.*, *Nature*, *522*, 167, 2015.

→ Bref

→ EXOBIOLOGIE
Vie extraterrestre

L'astrophysicien britannique Stephen Hawking a annoncé le 20 juillet, à Londres, le lancement d'un programme visant à détecter une vie intelligente extraterrestre en utilisant les moyens des plus puissants télescopes. « Breakthrough Listen », projet ambitieux, a reçu 100 millions de dollars (92 millions d'euros) de dotation de l'ancien physicien russe Youri Milner et devrait s'étaler sur dix ans.

www.breakthroughinitiatives.org/News/1

→ CLIMAT
Bourdons en danger

Sous l'effet du réchauffement climatique, l'aire de répartition des bourdons s'est rétrécie de 300 kilomètres au sud de l'Europe et de l'Amérique du Nord. C'est ce que révèle une étude menée auprès de 67 espèces de bourdons. Une situation préoccupante car, contrairement à d'autres espèces, ces pollinisateurs ne parviennent pas à migrer plus au nord.

J.T. Kerr *et al.*, *Science*, *349*, 177, 2015.

→ MATÉRIAUX
Condensateurs haute capacité et haute température

Des physiciens de Pennsylvanie ont mis au point un matériau constitué d'un polymère mélangé à des nanofeuilles de nitrure de bore. Dans un condensateur à isolant, ce diélectrique augmente la densité d'énergie de 40 % et permet de l'utiliser jusqu'à 300 °C. Un plus pour l'électronique de puissance utilisée dans l'industrie.

Q. Li *et al.*, *Nature*, doi:10.1038/nature14647, 2015.

INSTITUT DE BIOLOGIE MOLECULAIRE DES PLANTES, STRASBOURG

UN FRAGMENT MUTÉ d'*Arabidopsis* a été greffé sur une *Arabidopsis* sauvage : la présence de GA, molécules nécessaires à sa croissance, a été rétablie.

Botanique

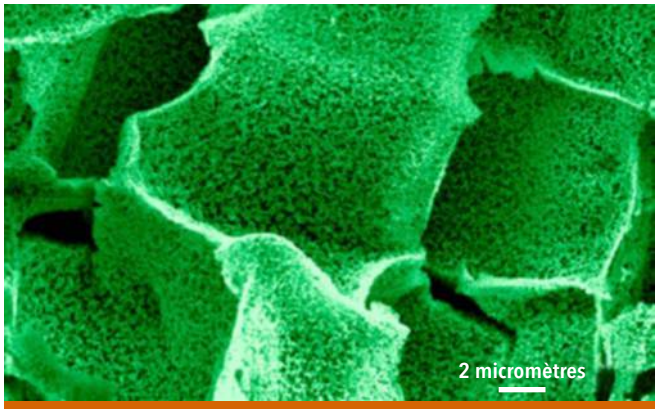
Les organes d'une plante communiquent par messager chimique

Un pas vient d'être franchi dans la compréhension des phytohormones gibbérellines (GA), cette grande famille de molécules impliquées dans la croissance des plantes. Depuis leur découverte dans les années 1930, près de 130 types de gibbérellines ont été répertoriés, mais seuls quelques-uns ont une activité biologique. Une équipe de l'Institut de biologie moléculaire des plantes (IBMP), à Strasbourg, a compris que la GA12 joue le rôle d'un messager chimique entre les racines, les feuilles et les fleurs, en circulant dans les vaisseaux qui transportent la sève entre ces organes [1]. Pour le démontrer, les biologistes ont réalisé des microgreffes sur *Arabidopsis thaliana*. Un fragment muté d'*Arabidopsis*, incapable de produire les formes de GA nécessaires à sa croissance, a notamment été greffé sur une *Arabidopsis* sauvage, ce qui a permis de rétablir la présence de GA dans le greffon, ainsi que sa croissance. La GA12 joue le rôle de précurseur : à son passage, elle induit l'action d'autres gibbérellines agissant directement sur la croissance. « *Elle opère comme un agent de communication entre les organes distants de la plante, pour relancer la croissance de l'organe receveur,* explique Patrick Achard, de l'IBMP. *Ce travail laisse entrevoir comment des organes distants peuvent coopérer ou coordonner leur croissance en fonction de contraintes environnementales, comme le manque d'eau.* » ■ **Mathias Germain**

[1] T. Regnault *et al.*, *Nature Plants*, doi:10.1038/nplants.2015.73, 2015.

Chimie Du roseau dans les batteries

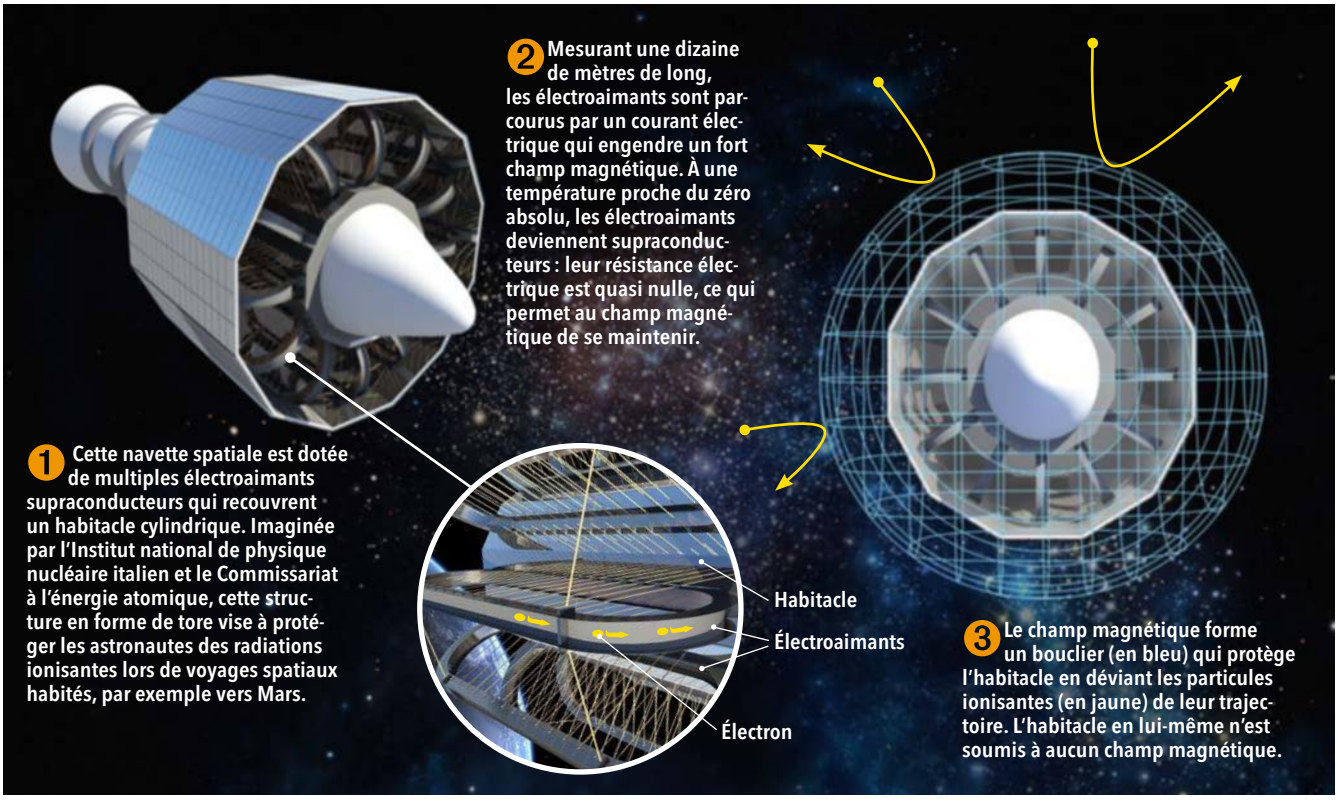
Dans les anodes des batteries lithium-ion – prédominantes dans l'électronique portable –, le silicium est un matériau attractif car ses performances théoriques sont dix fois supérieures à celles du graphite aujourd'hui utilisé. Toutefois, les procédés de fabrication compétitifs de silicium nanostructuré, nécessaire à la réalisation de ces anodes, manquent. Pour pallier cette difficulté, une équipe sino-allemande propose la transformation de simples feuilles de roseaux en ce matériau [1]. Les chimistes sont partis du constat que les nanostructures souhaitées pour ces anodes en silicium sont déjà présentes dans les réseaux de silice contenus dans certains végétaux, tels les roseaux. Des feuilles de roseaux ont donc été séchées, puis calcinées à 500 °C, permettant ainsi d'obtenir un réseau très poreux de silice, débarrassé du carbone et de l'hydrogène qui composaient principalement la plante. Lavée, cette silice (SiO_2) a ensuite été réduite en silicium (Si) par l'action du magnésium à haute température, tout en conservant les nanostructures initiales du végétal. Enfin, pour améliorer ses qualités électrochimiques, ce matériau en silicium pur a été recouvert d'une très fine couche de carbone, par l'action du glucose à 600 °C. Testées sur 4 000 cycles de charge-décharge, les anodes en silicium nanostructuré ont montré des capacités supérieures à celles des anodes actuelles en carbone. Cette performance, alliée à la simplicité et la durabilité du procédé de fabrication, en fait d'excellentes candidates au remplacement des anodes en graphite. ■ **Martin Tiano**



DES FEUILLES DE ROSEAU ont pu être transformées en silicium nanostructuré, matériau qui pourrait remplacer le graphite dans les anodes des batteries lithium-ion. WILEY-VCH

[1] J. Liu *et al., Angew. Chem. Int. Ed.*, doi:10.1002/anie.201503150, 2015.

Espace Bouclier magnétique pour vols habités



© SR2S/IMAGE : GIORGINA COLLEONI &VALERIO CALVELLI - TEXTE : GAUTIER CARIOU - INFOGRAPHIE : MARYVONNE MARCONVILLE

➜ Bref

➜ PHYSIQUE

Fermion de Weyl : fin d'une longue recherche

Enfin ! Le fermion de Weyl, baptisé en l'honneur du mathématicien et physicien qui avait prédit son existence il y a quatre-vingt-cinq ans, Hermann Weyl, vient d'être observé. C'est une équipe sino-américaine qui a isolé dans un cristal cette quasi-particule - une sorte d'excitation -, dont la particularité est d'avoir une masse nulle, ce qui en fait un excellent conducteur électrique.

L. Lu et *al.*, *Sciencexpress*, doi:10.1126/science.aaa9273, 2015.

➜ PALÉONTOLOGIE

Serpent à pattes

© DAVE MARTILL/UNIVERSITÉ DE PORTSMOUTH

Un serpent disposant de quatre petites pattes a été identifié à partir d'un fossile entreposé au musée de Solnhofen, en Allemagne. Le *Tetrapodophis amplectus*, qui vivait au début du Crétacé (125-112 millions d'années), illustre comment certains lézards ont évolué et progressivement perdu leurs membres.

D.M.Martill *et al.*, *Science, 349*, 416, 2015.

Climatologie « L'enjeu est d'améliorer les prévisions météorologiques à long terme »

DR

Fabio D'Andrea est physicien au Laboratoire de météorologie dynamique à l'École normale supérieure de Paris.

Une équipe internationale de climatologues est parvenue à reconstituer l'évolution de la circulation atmosphérique autour de l'océan Atlantique, année après année, sur une période de mille ans [1]. Une résolution encore jamais atteinte. Que cela implique-t-il ?

F.D'A. La trajectoire des perturbations atmosphériques autour du bassin nord-atlantique est directement liée aux variations de la circulation des masses d'air autour de l'Atlantique-Nord. Ce phénomène dit d'« oscillation nord-atlantique » (NAO) s'explique par la variation de la différence de pression entre l'anticyclone des Açores et la dépression d'Islande. Quand cette différence de pression est plus forte que la normale (NAO positive), les perturbations se déplacent vers le nord de l'Europe. Lorsqu'elle est plus faible (négative), les perturbations se déplacent vers le sud de l'Europe. Si l'on pouvait prévoir les changements de signe de la NAO, les prévisions météorologiques à long terme s'en trouveraient améliorées. C'est là tout l'enjeu des reconstitutions de la NAO du passé : plus elles seront précises, mieux on comprendra les causes de ces changements de signe. Et, dans le meilleur des cas, on pourra les prédire.

Comment ont-ils procédé ?

F.D'A. Avant 1820, il n'existe aucune mesure instrumentale et donc directe de la pression, de la température et de l'humidité. Or ces paramètres sont indispensables à la reconstitution de la NAO. Fort heureusement, il est possible d'estimer la valeur de ces paramètres par des mesures indirectes provenant de l'analyse des sédiments, des cernes des arbres, des carottes glaciaires, etc. Les auteurs de l'étude se sont donc procuré des données issues de 48 sources géologiques réparties tout autour de l'océan Atlantique. Mais encore leur a-t-il fallu faire le tri et ne sélectionner que les données les plus pertinentes. Pour cela, ils ont d'abord comparé les mesures directes de la pression faites après 1820 avec celles issues des mesures indirectes, pour ne garder que celles qui se recoupaient le mieux. Ils ont ensuite comparé ces données avec celles extraites de six modèles du climat et n'ont conservé que les données qui se ressemblent le plus. De quoi procéder ensuite à une reconstitution fine de la NAO.

Comment ont-ils évalué la pertinence de leur méthode ?

F.D'A. Ils ont utilisé de nombreux tests statistiques, notamment une approche dite « en modèle parfait », qui consiste à reproduire leur méthode de sélection des données décrite précédemment sur des modèles climatiques. L'avantage étant que la NAO de ces modèles est connue. En pratique, ils ont extrait de ces modèles des données indirectes sur la pression, la température, etc., puis ont tenté de reconstituer la NAO à partir de cette information. Il leur a ensuite suffi de vérifier la justesse de leur reconstitution en la comparant à la NAO déjà connue du modèle. Une façon maligne d'estimer la valeur de leur méthodologie qui, par ailleurs, surclasse les précédentes.

Quelles connaissances nouvelles se dégagent de leur reconstitution ?

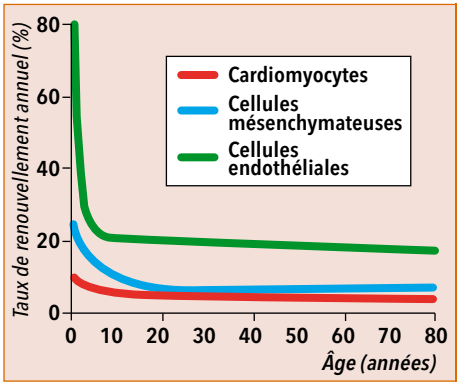
Ils se sont aperçus qu'après une éruption volcanique majeure, du type de celle du Pinatubo survenue en 1991, aux Philippines, la NAO devient systématiquement positive deux ans plus tard. Ils ont ainsi pu établir un fait d'une importance capitale pour la compréhension de la NAO. Il appartient maintenant aux physiciens de proposer une explication à ce phénomène. ■

Propos recueillis par Gautier Cariou

[1] P. Ortega *et al.*, *Nature, 523*, 71, 2015.

Santé La régénération des cellules du myocarde finalement

Un infarctus détruit des centaines de millions de cellules cardiaques, qui ne seront pour la plupart pas remplacées. La zone nécrosée ne se contracte alors plus correctement et peut devenir source de nouveaux troubles. La stimulation de la régénération cellulaire du myocarde constitue une voie privilégiée pour découvrir de nouveaux traitements thérapeutiques. Encore faut-il comprendre son fonctionnement.
Les études présentaient jusqu'à maintenant de surprenantes disparités, les unes expliquant qu'il n'y avait aucune régénération cellulaire, tandis que d'autres avançaient l'hypothèse d'une régénération intégrale tous les cinq ans ! Une équipe de l'Institut Karolinska de Stockholm, en Suède, affirme avoir établi avec fiabilité une carte du renouvellement cellulaire du myocarde. Selon les conclusions de leur étude, les trois types de cellules cardiaques – cardiomyocytes, cellules endothéliales et cellules mésenchymateuses – se régénèrent tout au long de la vie, bien qu'à des rythmes différents [1]. Ainsi, le taux de renouvellement annuel des cardiomyocytes décroît rapidement au cours des premières années de l'existence (lorsque le cœur est en phase de croissance) pour s'établir à 1 % vers l'âge de 10 ans, et ne plus jamais varier. Les cellules mésenchymateuses et endothéliales suivent une évolution similaire, bien que supérieure en proportion : leur taux de renouvellement s'établit respectivement à 4 % et 17 % à partir de 10 ans. Les biologistes suédois ont employé une méthode audacieuse pour obtenir ce résultat. Plutôt que de s'appuyer sur les méthodes classiques incomplètes (analyse de marqueurs moléculaires de prolifération) ou toxiques (administration de nucléotides marqués telle la 3H-thymidine), ils ont étudié le taux de carbone 14



EN ÉTUDIANT LE TAUX DE CARBONE 14 dans les cellules cardiaques, les biologistes ont mis en évidence que les cellules du myocarde se renouvellent tout au long de la vie. Leur taux de renouvellement décroît rapidement.

Paléontologie Un dinosaure ailé refait surface

La liste des dinosaures portant des ailes ne cesse de s'allonger : les paléontologues ont récemment identifié le *Zhenyuanlong suni* ou « Dragon de M. Zhenyuan Sun », du nom de son découvreur [1]. Avec 1,65 mètre, 20 kilogrammes, une dentition acérée, deux grandes ailes et le corps couvert de plumes, il arpentait les territoires correspondant à la Chine actuelle au Crétacé, il y a 125 millions d'années. C'est là, dans la province de Liaoning, que son fossile a été exhumé, dans une formation géologique connue pour fournir régulièrement des spécimens exceptionnellement conservés. Celui-ci n'échappe pas à la règle : son squelette est presque complet. Dans les sédiments qui l'enveloppent, l'empreinte de nombreuses plumes est visible ainsi que la forme et la structure complexe de ses grandes ailes. Beaucoup d'autres dromaeosauridés, la famille à laquelle il appartenait, avaient aussi des ailes. Mais l'origine et la fonction de ces organes, encore récents à l'époque, restent obscures. Proches cousins des oiseaux, dépassant rarement la taille de chats domestiques, la plupart des dromaeosauridés étaient capables de voler car la longueur de leurs bras et leur faible poids le leur permettaient. Mais *Zhenyuanlong suni* était probablement trop lourd et ses membres antérieurs trop courts pour qu'il puisse s'élever dans les airs. Cela pourrait signifier que les ailes sont d'abord apparues dans cette famille pour d'autres buts que le vol, en vue de parades nuptiales par exemple. À moins que les premiers dromaeosauridés, ancêtres de *Zhenyuanlong suni*, aient su voler et que cette fonction ait été ensuite perdue, comme chez les autruches actuelles. ■

JUNCHANG LU, STEVE BRUSATTE

SUR CE FOSSILE PRESQUE COMPLET de *Zhenyuanlong suni*, on peut voir la forme de ses grandes ailes. Mais le dinosaure était probablement trop lourd pour pouvoir voler.

Thibault Panis

[1] J. Lü et S.L. Brusatte, *Scientific Reports*, doi:10.1038/srep11775, 2015.

révélée

présent dans l'ADN des cellules de 29 cœurs, prélevés *post-mortem* sur des individus ne présentant aucun signe de pathologie et âgés de 1 mois à 73 ans.

Accélérer le processus. Cet isotope radioactif est normalement présent en quantité très faible dans l'atmosphère, mais les essais nucléaires à l'air libre réalisés jusqu'en 1963 ont augmenté ce taux de manière spectaculaire, qui décroît depuis. Or, lors de la création d'une cellule, son ADN incorpore du carbone 14 dans une proportion équivalente à l'atmosphère et ne varie plus. En analysant le taux de carbone 14 dans l'ADN des cellules d'un myocarde, les chercheurs ont donc pu dater précisément l'année de leur naissance et en déduire le taux de renouvellement cellulaire sur toute la durée de vie d'un individu. Philippe Menasché, chirurgien cardiaque et spécialiste de la thérapie cellulaire en cardiologie, souligne « *l'élégance* » de la technique et la « *solidité des résultats* ». « *Cela crédibilise la thèse qu'il y a des processus de régénération et que l'on pourra peut-être les activer ou les stimuler par des moyens pharmacologiques ou cellulaires* », ajoute-t-il. ■

Philippe Vion-Dury

[1] O. Bergmann *et al.*, *Cell*, *161*, 1, 2015.

➜ Bref

➜ VERBATIM

« Les premiers résultats de Philae nous donnent un aperçu des processus chimiques précurseurs de l'apparition de la vie. »

Nicolas Altobelli, responsable de la mission Rosetta à l'ESA, dans *Le Monde* du 30 juillet, après la détection de molécules organiques sur la comète Tchouri.

➜ ANIMAUX

Le privilège du coq alpha

Dans un poulailler, le premier à chanter le matin est toujours le mâle dominant. Des chercheurs l'ont vérifié en faisant se confronter des coqs qui ne se connaissaient pas. Une fois la hiérarchie instaurée, le chef chantait d'abord, suivi des autres.

T. Shimmura *et al.*, *Scientific Reports*, doi : 10.1038/srep11683, 2015.

➜ PHYSIQUE

Traînée réduite

L'efficacité du patinage sur glace illustre l'effet lubrifiant de la glace sur les solides. Mais dans du liquide ? Pour le savoir, des physiciens ont recouvert des billes métalliques d'une coquille de glace avant de les lâcher dans l'eau. Une caméra rapide a révélé une réduction de 50 % de la traînée pour les billes glacées par rapport aux billes normales, ce qui résulterait de l'effet stabilisant d'un film d'eau qui se forme près de la glace.

I.U. Vakarelsi *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, *115*, 044501, 2015.

Climat Avec la chaleur, les précipitations s'intensifient

L'augmentation des températures a une incidence non seulement sur la fréquence et l'intensité des précipitations, mais aussi sur la dynamique des tempêtes. C'est ce qu'ont révélé deux chercheurs de l'université de Nouvelle-Galles du Sud, en Australie. Ils ont analysé trente années de données issues de mesures de précipitations recueillies toutes les six minutes et récoltées dans 79 stations réparties à travers toute l'Australie [1]. L'intérêt réside dans le fait que le pays dispose, par son étendue, d'une grande variété de climats, et donc de températures. Ils ont ainsi découvert que plus les températures étaient élevées, moins la distribution temporelle des précipitations est uniforme. En clair, *« les pics de précipitations sont plus intenses, mais les précipitations s'arrêtent également plus rapidement »*, explique Hervé Douville, chercheur à Météo France. Ces données ont permis aux chercheurs d'échafauder des scénarios d'évolution des précipitations dans le cadre du réchauffement climatique. Par exemple, dans l'hypothèse d'un réchauffement atmosphérique global de 5 °C, l'intensité des pics pourrait augmenter de 5 à 20 % d'ici à la fin du siècle. *« Cela peut paraître faible, mais cela augmente le risque de crues rapides des rivières et donc d'inondations*, explique le spécialiste. *Ce qui fait la nouveauté de cette étude, c'est le nombre de stations étudiées, ainsi que la fréquence des mesures de précipitations, qui permet d'analyser le cumul local et la dynamique des événements précipitants ».* ■

Bérénice Robert

[1] C. Wasko et A. Sharma, *Nature Geoscience*, doi:10.1038/ngeo2456, 2015.

Physique Nouvelle source d'isotopes pour la médecine nucléaire

Tests de résistance au stress du cœur, scintigraphie osseuse… Ces diagnostics par imagerie sont très courants en médecine nucléaire et leur réalisation requiert un isotope précis : le technétium 99m. Cet atome est créé à partir d'un autre isotope radioactif, le molybdène 99. Or la production de ce dernier pose des problèmes. D'abord, de nombreux réacteurs qui le fabriquent, trop vétustes, vont fermer dans les prochaines années. Et son mode de production n'est pas sûr. D'où l'intérêt de la nouvelle méthode que des physiciens du département américain de l'énergie ont testée avec succès [1]. Baptisée Mini-Shine, elle consiste à produire des neutrons, particules neutres présentes dans le noyau des atomes, avec l'accélérateur linéaire du Laboratoire national d'Argonne. Ils sont ensuite envoyés sur une solution aqueuse faite d'uranium faiblement enrichi – là où les méthodes actuelles privilégient de l'uranium hautement enrichi, plus dangereux. La collision entre les deux entraîne la fission de l'uranium en des centaines d'isotopes, dont le molybdène 99 dans 6 % des cas. Après avoir isolé ces atomes, les physiciens ont testé leur niveau de pureté : selon eux, il est comparable à celui obtenu avec les méthodes actuelles, et supérieur aux standards internationaux (soit 95 %). Ces tests sont les premiers d'une série. S'ils sont concluants, ils conduiront à l'utilisation commerciale de cette technique à l'horizon 2018. L'objectif à terme est de produire deux tiers de la demande annuelle des États-Unis. ■

Vincent Glavieux

[1] Département américain de l'énergie, 2015, http://1.usa.gov/1dA5tYU

➜ Bref

➜ BIOLOGIE ANIMALE
Question de constriction

Le boa constrictor étouffe-t-il ses proies comme on le croit habituellement ? Non, répondent des biologistes américains qui ont étudié la circulation sanguine chez des rats anesthésiés subissant l'étreinte mortelle pendant six minutes en moyenne. C'est l'arrêt circulatoire qui serait à l'origine du décès et non le manque d'oxygène.

S. Boback *et al., J. Exp. Biol., 218,* 2279, 2015.

➜ MATHÉMATIQUES
Bons résultats à l'Olympiade internationale

L'équipe de six lycéens français a terminé 14e de l'Olympiade internationale de mathématiques qui s'est tenue en juillet à Chiang Mai en Thaïlande, et première d'Europe de l'Ouest (sur 104 pays). C'est son meilleur résultat depuis 1992. À titre individuel, les élèves ont rapporté 3 médailles d'argent et 3 médailles de bronze.

http://tinyurl.com/lyceens-medailles

➜ BIOLOGIE MÉDICALE
Un diagnostic grâce à la lumière des lucioles

En modifiant chimiquement la luciférase, l'enzyme responsable de la lumière des lucioles, des scientifiques de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, en Suisse, ont réussi à l'utiliser comme balise lumineuse pour détecter des protéines cibles dans des cellules en culture. Une technique utile pour les diagnostics médicaux.

A. Schena *et al., Nat. Commun.*, doi : 10.1038/ncomms8830, 2015.

NASA/JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY/SOUTHWEST RESEARCH INSTITUTE

Astronomie

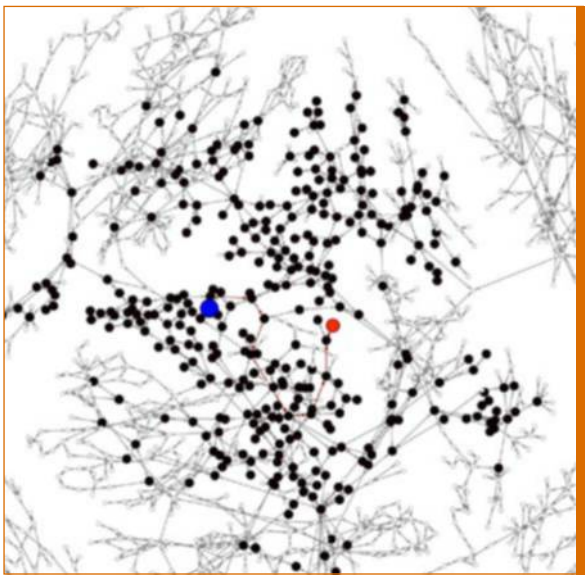
Étonnante Pluton

Pluton n'est plus cet astre méconnu aux confins du système solaire. Après plus de neuf ans de voyage, la sonde américaine New Horizons, qui est passée à proximité le 14 juillet dernier, l'a photographié et analysé sous toutes les coutures. L'ensemble des données recueillies de cet astre glacé et de ses satellites mettra encore plus d'un an à nous parvenir – pas de haut débit pour de telles distances – , mais les premiers gros plans ont déjà apporté leur lot de surprises [1]. La surface jeune, peu cratérisée, est le signe d'une activité géologique intense, ce que corrobore la présence étonnante de montagnes de plusieurs kilomètres de haut (zoom). Une activité qui résulte sans doute en partie de l'orbite particulière de Pluton, très allongée et inclinée de près de 60° par rapport au plan de l'orbite de la Terre autour du Soleil. Coulées de glace, atmosphère qui s'échappe, les surprises ne s'arrêtent pas. À mesure que les images arrivent, nous en apprenons plus sur cette planète naine – plus petite que la Lune – ainsi que sur ses cinq satellites, dont Charon, le plus imposant d'entre eux. L'enquête ne fait que commencer. ■ **Philippe Pajot**

[1] http://pluto.jhuapl.edu

Informatique À la recherche du patient zéro

Identifier la source d'une épidémie – le patient zéro – aide à comprendre comment elle a démarré. Dans des épidémies virales, on peut, en étudiant les mutations génétiques du virus, remonter à cette origine. Comment faire en revanche si l'on ne connaît pas l'évolution temporelle de l'épidémie, mais que l'on a uniquement accès au statut infectieux à un instant donné ? L'équipe de Nino Antulov-Fantulin, à Zagreb, en Croatie, a mis au point une méthode statistique qui, à partir d'un instantané de l'état d'une population infectée, permet d'estimer la source de cette infection [1]. L'avantage de la méthode est sa généralité : elle ne présuppose pas que le réseau, qui modélise la population, a une structure donnée (par exemple celle d'un arbre). La population est représentée par un réseau très général où chaque nœud est connecté à ses voisins. Un nœud infecté peut infecter un voisin qui, une fois infecté, finit par guérir mais peut avoir transmis la maladie à son tour. L'approche combine travail analytique et simulations. Plus précisément, on compare les données réelles à un instant donné à celles qui sont obtenues par des simula-



NINO ANTULOV-FANTULIN/RUDER BOSKOVIC INSTITUTE

CE RÉSEAU MODÉLISE les interconnections dans une population lors d'une épidémie. Grâce à une méthode statistique et des simulations de type Monte-Carlo, il est possible d'identifier la source la plus probable de l'infection, le patient zéro (ici en rouge).

Santé Sans abeilles, des aliments de moins bonne qualité

Le déclin des insectes pollinisateurs, comme les abeilles, affectera directement la santé humaine. C'est la conclusion [1] à laquelle est arrivée une équipe de l'école de santé publique de l'université Harvard, aux États-Unis, en combinant trois types de données : des estimations de la consommation quotidienne par habitant de 224 aliments dans 156 pays, la teneur de ces aliments en différents nutriments, et la dépendance de chaque culture aux pollinisateurs. *« Nous avons ainsi évalué, avec différents scénarios de déclin des pollinisateurs, le risque de déficience en vitamine A, en vitamine B9, et l'apport en fruits, en légumes, et en noix et graines »*, explique Samuel Myers, auteur principal de l'étude. Grâce à cela, les chercheurs ont quantifié la charge globale de morbidité (qui mesure l'état de santé d'une population, en associant les années de vie perdues, soit à cause d'une mortalité prématurée, soit du fait d'années vécues en étant malade) pour chaque pays, en fonction du déclin des pollinisateurs. L'étude montre que la disparition complète de ces insectes augmenterait de 1,42 million le nombre annuel de décès causés par des maladies non transmissibles ou liés à la malnutrition. En outre, le nombre de personnes déficientes en vitamines A

LA DISPARITION DES ABEILLES et autres pollinisateurs augmenterait la malnutrition et les carences en vitamines A et B9 chez l'homme, selon une étude de l'université Harvard. STEPHEN AUSMUS/USDA-ARS

tions d'infection sur le réseau en supposant qu'un nœud donné est le patient zéro. Grâce à ces simulations de type Monte-Carlo, on trouve la probabilité pour chaque nœud du réseau d'être le patient zéro, ce qui permet d'estimer le patient zéro le plus probable. Lorsque les infections se répandent rapidement, le patient zéro peut être localisé avec une forte probabilité, ce qui n'est pas le cas pour des infections lentes ou pour des petites populations. ■ **Philippe Pajot**

[1] N. Antulov-Fantulin *et al., Phys. Rev. Lett., 114*, 248701, 2015.

et B9 s'accroîtrait respectivement de 71 et 173 millions. Enfin, plus de 3 milliards d'individus souffrant déjà de ces carences (2,2 milliards pour la vitamine A et 1,23 milliard pour la vitamine B9) verraient leur cas s'aggraver. Selon Tim Wheeler, professeur en phytotechnie à l'université de Reading, en Angleterre, « *cette conclusion se démarque particulièrement du reste de l'étude, qui doit être prise comme un ordre de grandeur en raison du nombre d'hypothèses sur lesquelles s'appuient les auteurs.* » ■

Bérénice Robert

[1] M. Smith et al., *The Lancet*, doi:10.1016/S0140-6736(15)61085-6, 2015.

➜ Bref

Indicateur

700

médicaments génériques testés en Inde ont été mis au ban par l'Agence européenne du médicament. L'interdiction de commercialisation fait suite à des irrégularités constatées dans les essais cliniques de bioéquivalence dans une entreprise indienne.

http://tinyurl.com/generiques-Inde

➜ ASTRONOMIE

Cousine de la Terre

Kepler-452b, planète d'une taille voisine de celle de la Terre, a été observée par Kepler, télescope spatial de la Nasa, autour d'une étoile du même type que le Soleil. Cette exoplanète a un diamètre 60 % supérieur à celui de la Terre et tourne autour de son étoile en 385 jours. Cela porte à une trentaine le nombre connu de telles planètes situées dans la zone habitable de leur étoile, région où l'eau peut être liquide.

J. Jenkins et al., Astron. J., 150, 56, 2015.

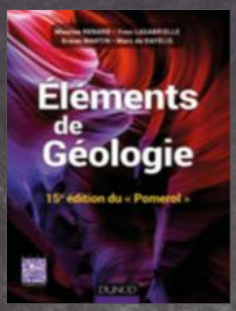
➜ PHYSIQUE

Le mystère des flaques résolu

Pourquoi les flaques d'eau ne s'écoulent-elles pas indéfiniment ? Des physiciens américains ont montré qu'il s'agit d'une question d'interactions entre les molécules du liquide et celles du solide sur lequel il s'écoule : plus la flaque s'étend, et plus ces interactions deviennent fortes au point de stopper l'écoulement.

A. A. Pahlavan et al., Phys. Rev. Lett., 115, 034502, 2015.

La rentrée des sciences chez DUNOD



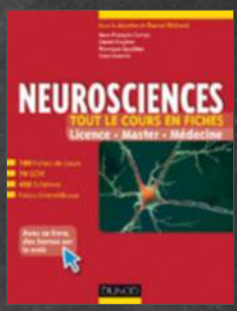
9782100724802 • 55,00 €

9782100725823 • 39,50 €

9782100716890 • 39,00 €

9782100724079 • 35,00 €

9782100722228 • 29,00 €



9782100585045 • 38,00 €

9782100720736 • 25,00 €

9782100724253 • 35 €

www.dunod.com

DUNOD
ÉDITEUR DE SAVOIRS

Physique Deux pentaquarks découverts au LHC

Il y a une quinzaine d'années, des physiciens pensaient avoir trouvé le pentaquark, particule dont l'existence a été prédite en 1964. Mais ils avaient dû déchanter : d'autres expériences montrèrent que la découverte de cette particule exotique, composée de cinq particules élémentaires de matière – quatre quarks et un antiquark – n'était due qu'à une mauvaise analyse des données. Cette fois, la collaboration LHCb, au CERN, en Suisse, en est certaine : elle a mis la main sur deux pentaquarks. Le niveau de fiabilité de son résultat – une chance sur 10 millions de milliards (10^{16}) qu'il s'agisse du hasard – est le résultat d'une méthode d'analyse beaucoup plus complète que celle employée précédemment [1]. Deux quarks hauts, un quark bas, un quark charme et un antiquark charme : voilà de quoi se composent les deux pentaquarks repérés. Leur masse – exprimée en électronvolts (eV), l'unité utilisée en physique des particules – est, elle, estimée à 4,45 et 4,380 eV. Ce résultat est le fruit d'un vrai jeu de piste. En effet, le pentaquark est une particule extrêmement instable, qui possède une durée de vie très brève : environ 10^{-20} seconde ! Impossible, donc, de l'observer directement. Il faut en trouver des traces indirectes, par exemple en reconstituant le processus de désintégration de particules créées dans des collisions à des niveaux d'énergie phénoménaux. En l'occurrence, les membres de LHCb ont repéré les deux pentaquarks en étudiant 26 007 cas où la collision extrêmement violente entre deux faisceaux de protons, au LHC, a produit un baryon lambda se désintégrant en trois particules : un méson, un kaon et un proton. L'analyse des propriétés de ces particules

CERN

CHAQUE PENTAQUARK repéré par la collaboration LHCb se compose de deux quarks hauts, un quark bas, un quark charme et un antiquark charme, comme illustré ici. Mais il ne vit que 10^{-20} seconde !

Santé Vers la production de sang universel

Convertir le sang de n'importe quel donneur en sang universel : c'est un rêve de médecin qui pourrait bien devenir réalité. Une équipe canadienne a en effet mis au point une enzyme capable de retirer partiellement les antigènes qui, à la surface des cellules sanguines, déterminent le groupe sanguin [1]. Or la non-compatibilité des groupes sanguins lors des transfusions sanguines est causée particulièrement par la présence d'antigènes « A » et « B » à la surface des cellules du sang.
L'enzyme créée, de la famille des glycosidases, a la propriété de couper sélectivement les sucres complexes (ou polysaccharides) qui servent de lien entre les marqueurs sanguins A et B et la cellule. Pour la synthétiser, les chercheurs sont partis de la glycosidase SP3-BS71, une molécule extraite de la bactérie *Streptococcus pneumoniae* (pneumocoque) qui présente déjà une modeste activité envers ce type de polysaccharides. En déclenchant des mutations ciblées successives dans la chaîne d'acides aminés qui constitue SP3-BS71, les biologistes ont peu à peu modifié sa configuration spatiale et ses propriétés chimiques, jusqu'à obtenir une enzyme 170 fois plus active. Cette dernière permet de retirer la majorité des antigènes des cellules, en coupant sélectivement les deux principaux types de liens.
Si ces travaux sont une étape significative vers la fabrication de sang universel, des améliorations notables sont encore attendues. En particulier, la glycosidase artificielle doit aussi reconnaître, et sectionner, les deux autres types de liens qui existent pour laisser les cellules totalement exemptes d'antigènes sanguins. ■ **Martin Tiano**

[1] D.H. Kwan *et al., J. Am. Chem. Soc., 137*, 5695, 2015.

BURGER/PHANIE

FABRIQUER DU SANG UNIVERSEL à partir de celui de n'importe quel donneur pourrait être possible grâce à une enzyme retirant les antigènes qui déterminent le groupe sanguin.

finales les a mis sur la voie des pentaquarks. Celle-ci a révélé que, dans environ 12 % des cas, la désintégration du baryon lambda passe par une étape intermédiaire, où se forment d'autres particules. Comment s'en sont-ils rendu compte ? Grâce à la découverte d'un pic inattendu dans ce qu'on appelle la distribution de masse des particules finales.

Paramètres. Afin d'expliquer ce pic, les physiciens ont cherché à identifier les particules qui se forment dans cette étape intermédiaire, à l'aide de simulations numériques. Celles-ci comptaient cinq paramètres, soit quatre de plus que dans toutes les expériences précédentes : la distribution de masse, plus les quatre angles de direction que peuvent prendre les particules issues des collisions. Après avoir épuisé toutes les options conventionnelles, le groupe de chercheurs a testé celle des pentaquarks. C'est là qu'il a, enfin, retrouvé le pic inattendu dans ses données finales. Cette découverte reste soumise à la confirmation par une expérience indépendante. La collaboration LHCb, elle, va maintenant s'atteler à mieux comprendre ses pentaquarks, et notamment comment s'organisent les particules qui les constituent. ■

Vincent Glavieux

[1] Collaboration LHCb, arXiv:1507.03414, 2015.

→ Bref

→ ÉCOLOGIE

Repousse des forêts

Lorsqu'une forêt brûle ou est rasée, quel type de végétation repousse ensuite ? Des chercheurs en ont réalisé un modèle à partir d'observations de terrain. Conclusion : le hasard est prédominant sur tous les autres facteurs. Ce résultat va contre l'idée jusqu'alors admise d'un renouvellement déterministe.

N. Norden *et al.*, *PNAS*, *112*, 8013, 2015.

→ MANDRILLS

Cris familiers

LAB. ENES, UNIV. J. MONNET, SAINT-ÉTIENNE.

Des chercheurs français étudiant les singes mandrills du Gabon ont montré la double influence du groupe et de la génétique dans la constitution de leur voix. Cette signature vocale, comparable à l'accent des humains, leur permet de s'identifier à coup sûr, y compris pour des individus qui ne se sont jamais croisés.

F. Levréro *et al.*, *Nat. Commun.*, *6*, 7609, 2015.

Indicateur

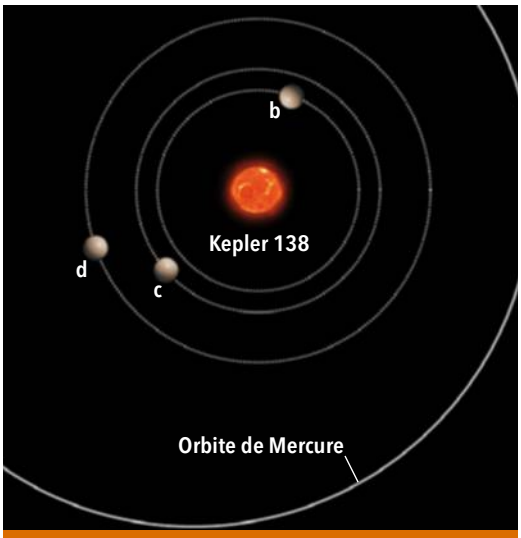
550 000

ans : c'est l'âge d'une dent humaine adulte mise au jour le 23 juillet dernier dans la grotte de Tautavel, dans les Pyrénées-Orientales. C'est l'un des plus vieux restes humains jamais découverts en Europe.

Astrophysique

Une toute petite exoplanète

Des astronomes américains ont établi que l'une des planètes découvertes par le télescope spatial Kepler, baptisée Kepler-138 b, serait très similaire à Mars : rocheuse, d'une masse d'environ un dixième de celle de la Terre et d'une taille moitié moindre [1]. C'est la plus petite exoplanète dont on a pu déterminer la masse. Entre 2009 et 2013, le télescope Kepler a décelé 4 600 candidats exoplanètes, dont 500 auraient une taille inférieure à celle de la Terre. Cette détection donne la taille des candidats. Pour confirmer qu'il s'agit bien d'exoplanètes et déterminer leur nature – rocheuse ou gazeuse –, on mesure habituellement, à l'aide d'autres télescopes, les déplacements de l'étoile dus à la présence de la planète. Une méthode qui échoue pour des planètes trop peu massives, car elles n'induisent pas de déplacement mesurable. Impossible alors d'évaluer la masse et la densité d'une petite planète et donc de déterminer si elle est rocheuse ou gazeuse. Pour y parvenir, ils ont élaboré une méthode fondée sur l'étude des interactions gravitationnelles entre Kepler-138 b et deux autres planètes du même système, plus éloignées de l'étoile et de diamètre légèrement supérieur à celui de la Terre. La proximité de ces trois planètes induit des distorsions gravitationnelles affectant la régularité de la fréquence des cycles orbitaux. En analysant ces variations, les astronomes ont pu établir la masse et la nature rocheuse des trois planètes observées. ■ **Philippe Vion-Dury**



© INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

LES TROIS EXOPLANÈTES de l'étoile Kepler-138 ont été découvertes par le télescope spatial Kepler. Kepler-138 b serait de masse très similaire à celle de Mars.

[1] D. Jontof-Hutter *et al.*, *Nature, 522,* 321, 2015.

Entomologie

Le moustique du paludisme est un agent double

Le moustique *Anopheles gambiae*, connu pour être le principal vecteur du paludisme en Afrique, est aussi capable de porter et de transmettre un autre agent infectieux. Il s'agit de *Rickettsia felis*, bactérie responsable de fièvres, de maux de tête et d'éruptions cutanées chez l'homme. C'est ce que vient de démontrer l'équipe Entomologie médicale de la faculté de médecine de Marseille [1].

Jusqu'à aujourd'hui, les puces du chat et du chien étaient considérées comme les seules capables d'inoculer *Rickettsia felis* à l'homme. Mais, en 2012, en Côte d'Ivoire, des analyses génomiques ont révélé la présence de la bactérie dans l'organisme de ces moustiques. Le moustique était-il capable de transmettre la bactérie ? Pour le savoir, les infectiologues marseillais ont réalisé une première expérience en laboratoire. Les moustiques ont été nourris avec du sang infecté par *Rickettsia felis*. Quinze jours après, les chercheurs ont disséqué les insectes pour observer sa dissémination dans leurs organes. Par fluorescence, la présence de la bactérie a été identifiée dans les glandes salivaires, l'appareil digestif, et les ovaires des femelles. Seconde expérience, les biologistes ont démontré que les moustiques étaient des vecteurs de transmission entre une souris infectée et deux souris saines. Pour Philippe Parola, responsable de l'étude, ces résultats expliquent les nombreux cas de fièvres d'origine inconnue diagnostiqués dans les zones de paludisme en Afrique pendant la saison des pluies. ■ **Mathias Germain**

D.R

EN AFRIQUE, LE MOUSTIQUE *Anopheles gambiae,* vecteur du paludisme, peut aussi transmettre *Rickettsia felis,* bactérie provoquant de la fièvre, des maux de tête et des éruptions cutanées.

[1] C. Dieme *et al.*, *PNAS, 112,* 8088, 2015.

Pollution : comment réduire les coûts ?

Une commission d'enquête pointe dans un rapport le coût exorbitant de la pollution de l'air. Et préconise la mise en place d'une fiscalité écologique.

La pollution de l'air en France coûte cher, très cher : 101,3 milliards d'euros par an. C'est la conclusion du rapport sénatorial sur le coût économique et financier de la pollution de l'air, rendu public le 15 juillet dernier. « *Subir la pollution de l'air est une aberration sanitaire et économique* », estiment les sénateurs. Ils ont additionné le coût sanitaire de la pollution, compris entre 68 et 97 milliards d'euros par an et incluant notamment les dépenses dues au traitement des pathologies liées à la pollution, et le coût non sanitaire (dégradation des bâtiments, diminution du rendement agricole), estimé *a minima* à 4,3 milliards d'euros. Comment y remédier ? L'une des pistes proposées par les sénateurs est la mise en place « *d'une véritable fiscalité écologique* ». Ils recommandent par exemple l'instauration d'une taxe sur les émissions d'azote, d'oxydes d'azote et de particules fines, ou l'alignement progressif de la fiscalité du diesel et de l'essence d'ici à 2020. Une solution « *non seulement possible, mais nécessaire* » selon Gilles Rotillon, professeur émérite en économie de l'environnement à l'université Paris Ouest. « *La fiscalité écologique est un bon instrument pour modifier les comportements, à condition qu'on en présente les avantages, par exemple le financement d'un bien public comme un air de meilleure qualité, et que des solutions non polluantes soient proposées.* »

ERIC BERACASSAT/ONLY FRANCE

101,3 MILLIARDS D'EUROS par an : le coût de la pollution de l'air en France, calculé par des sénateurs, est très élevé.

Un premier pas en ce sens a été fait le 22 juillet avec l'adoption définitive au Parlement de la loi sur la transition énergétique : un amendement prévoit une augmentation de la taxe carbone, aujourd'hui à 14,5 euros la tonne. Elle devrait atteindre 56 euros en 2020 et 100 euros en 2030. ■ **Bérénice Robert**

http://www.senat.fr/rap/r14-610-1/r14-610-11.pdf

→ JUSTICE

Un chercheur en prison

Dong-Pyou Han, professeur assistant en sciences biomédicales de l'université d'État de l'Iowa, aux États-Unis, a été condamné le 1er juillet à 57 mois de prison. En 2008, il avait annoncé avoir accompli une avancée majeure dans la recherche du vaccin contre le sida, avant d'avouer avoir falsifié les résultats quelques années plus tard. Il devra également rembourser 7,2 millions de dollars (6,6 millions d'euros) aux instituts américains de la santé et agences fédérales qui avaient financé les recherches.

→ NUCLÉAIRE

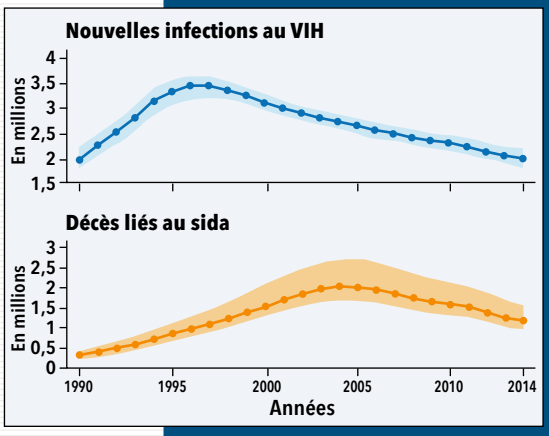
Accord historique

L'accord sur le nucléaire signé par l'Iran le 14 juillet à Vienne a été entériné par le conseil de sécurité de l'ONU le 20 juillet. Son objectif principal : limiter l'enrichissement d'uranium, qui permet de fabriquer la bombe atomique. S'il est respecté, les sanctions qui avaient été prises par l'Union européenne, les États-Unis et l'ONU contre l'Iran devraient être progressivement levées.

→ SANTÉ

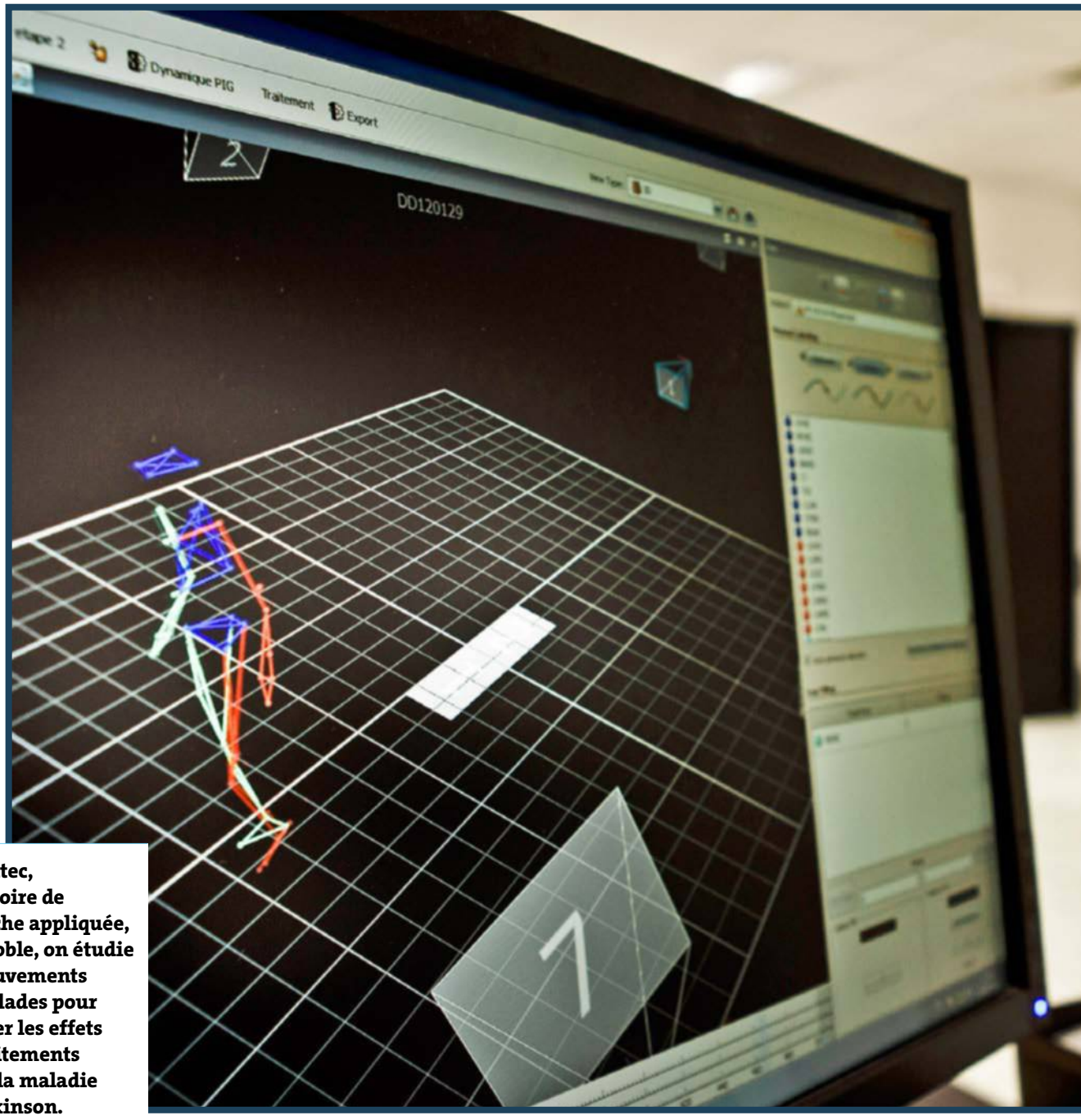
L'épidémie de sida enrayée

Selon le rapport publié par le Programme commun des Nations unies sur le VIH/sida le 14 juillet, les attentes en termes de lutte contre le sida du sixième objectif du Millénaire pour le développement ont été dépassées. Le but fixé de 15 millions de personnes sous « traitement antirétroviral salvateur » contre le VIH d'ici à 2015 a été atteint en 2014, neuf mois avant l'échéance. Les nouvelles infections ont en outre chuté de 35 % entre 2000 et 2014, et les décès liés à la maladie de 42 % entre 2004 et 2014. Prochaine étape : la fin de la pandémie d'ici à 2030. Un objectif ambitieux qui nécessitera un investissement annuel de 32 milliards de dollars (29 milliards d'euros) jusqu'à 2020, soit 10 milliards de plus qu'aujourd'hui. Source : http://aidsinfo.unaids.org/#



Trois stratégies Parkinson

Dossier préparé par Mathias Germain



DUNG VO TRUNG/LOOKATSCIENCES

À Clinatec, laboratoire de recherche appliquée, à Grenoble, on étudie les mouvements des malades pour observer les effets des traitements contre la maladie de Parkinson.

pour vaincre

La maladie de Parkinson s'attaque aux neurones producteurs de la dopamine, un neurotransmetteur essentiel pour le contrôle de la motricité. Ralentissement des mouvements, rigidité musculaire, tremblements, tels sont les symptômes dont souffrent au quotidien les malades. Des traitements existent pour supprimer temporairement ces symptômes. Mais de récentes découvertes réalisées par des équipes françaises vont plus loin. Elles ouvrent des pistes pour stopper la dégénérescence des neurones : stimuler les neurones à l'aide de la lumière infrarouge, traiter les anomalies d'une protéine à l'origine de la maladie, ou utiliser un vecteur viral pour apporter des molécules thérapeutiques.

1 **Alim-Louis Benabid : « Les infrarouges redonnent de l'énergie aux neurones »** propos recueillis par Mathias Germain

2 **Des mouvements sous contrôle** par Mathias Germain

3 **S'attaquer aux protéines folles** par Anne Debroise

4 **Soigner avec des gènes** par Mathias Germain

> *La maladie de Parkinson • 1*

1 • ALIM-LOUIS BENABID

« Les infrarouges redonnent de l'énergie aux neurones »

Entretien De la stimulation cérébrale profonde pour traiter les symptômes de Parkinson à sa dernière découverte qui pourrait stopper la progression de la maladie, le neurochirurgien français revient sur une belle aventure scientifique. **Propos recueillis par Mathias Germain.**

À soixante-treize ans, Alim-Louis Benabid a des projets plein la tête. Enthousiaste, il s'apprête à expérimenter chez les personnes souffrant de la maladie de Parkinson une illumination par rayonnements proches de l'infrarouge : cette technique stopperait la progression de la maladie. Sur les modèles animaux, les résultats sont très encourageants. Le neurochirurgien grenoblois reste à la pointe de la recherche, vingt-huit ans après sa découverte de la stimulation électrique à haute fréquence dans le traitement des symptômes de la maladie de Parkinson, qui a permis de traiter plus de 100 000 malades à travers le monde, et pour laquelle il a reçu le prix Lasker 2014 (décerné par la Fondation Lasker depuis 1946, récompensant des personnalités de la recherche médicale clinique et fondamentale) et le Breakthrough Prize in life sciences 2015 (créé en 2013 par les fondateurs de Facebook, de Google et de 23andMe).

Ses travaux ne se résument pas à Parkinson. En 2009, avec l'appui du CEA et le soutien de la fondation Edmond J. Safra, il crée Clinatec, un laboratoire hors normes rassemblant dans un même lieu des médecins, des biologistes, des mathématiciens, des roboticiens… Avec une stratégie : puiser dans la recherche fondamentale les nouvelles ressources qui permettent de mettre au point des traitements utiles aux malades. ›››

PIERRE JAYET

« Les infrarouges redonnent de l'énergie aux neurones »

>>> LA RECHERCHE : Comment avez-vous découvert les effets de la stimulation cérébrale profonde à haute fréquence ?

ALIM-LOUIS BENABID : C'est en faisant les préparatifs pour une opération chirurgicale chez une personne souffrant de tremblement essentiel, une maladie neurologique, que j'ai observé les effets de la stimulation électrique à haute fréquence. Cette opération vise à détruire une petite partie du thalamus, le noyau Vim, noyau central intermédiaire, ce qui permet de supprimer le tremblement. Pour repérer très précisément ce noyau d'une dizaine de millimètres, on utilise une stimulation électrique à basse fréquence. En effet, l'excitation de ce noyau déclenche les tremblements du patient : on sait ainsi qu'on a localisé la cible à opérer. C'est en modulant les paramètres de ce stimulateur que je me suis aperçu que le patient arrêtait de trembler quand j'augmentais la fréquence des stimulations au-dessus de 100 hertz [1]. Une véritable surprise car, à cette époque, la stimulation électrique était connue pour ses effets excitateurs et non inhibiteurs.

Avez-vous immédiatement perçu l'intérêt de cette observation pour le traitement des symptômes de la maladie de Parkinson ?

A.-L.B. : Oui, car les tremblements font partie des trois symptômes importants de la maladie de Parkinson. En 1990, l'attention s'est portée sur le noyau subthalamique, un des noyaux gris centraux du cerveau, dont le rôle dans le contrôle de la motricité venait d'être démontré par Mahlon DeLong, à l'université Emory, à Atlanta aux États-Unis, et par Tipu Aziz à l'université d'Oxford en Angleterre, puis ensuite par Abdelhamid Benazzouz à l'université de Bordeaux. Grâce à ces travaux, nous avons pu assez vite appliquer la technique chez des malades : le premier a été opéré à Grenoble en 1993. Cela s'explique par le fait que nous n'avons pas eu à inventer d'appareil nouveau. Surtout, la stimulation cérébrale profonde présente l'avantage d'être réversible, modulable et non destructrice [2]. Aujourd'hui en France, 17 services de neurochirurgie l'appliquent sur la maladie de Parkinson avec, pour les services les plus actifs, une cinquantaine d'opérés par an.

Concrètement, en quoi consiste la stimulation cérébrale profonde ?

A.-L.B. : Le principe consiste à implanter deux électrodes très fines dans le noyau subthalamique de chaque hémisphère. Cela se fait grâce à la stéréotaxie, technique d'imagerie qui permet de définir une position très précise dans l'espace, et de faire une chirurgie mini-invasive. Les deux électrodes sont reliées à une batterie, comme un pacemaker, placé sous la peau du patient au niveau de la clavicule. La stimulation est réglée en haute fréquence, 130 hertz, avec un voltage entre 1 et 4 volts suivant le malade. C'est du sur-mesure. À peine le système calé, l'effet est spectaculaire : le malade n'a plus de tremblements ni aucun des troubles moteurs qui apparaissent après plusieurs années de traitement médicamenteux.

À quel moment de la maladie la stimulation cérébrale profonde est-elle indiquée ?

A.-L.B. : Ce traitement intervient en deuxième intention. Au départ, lorsque la maladie est diagnostiquée, le malade reçoit un traitement médicamenteux, qui va pallier le déficit de dopamine dans le cerveau. La maladie de Parkinson correspond à une destruction des neurones qui produisent cette molécule. Il s'agit d'un neurotransmetteur essentiel pour les neurones des noyaux gris centraux, comme le thalamus. Privés de dopamine, les neurones de ces noyaux ne peuvent plus correctement transmettre l'influx nerveux. Cela provoque des dysfonctionnements dans le contrôle des mouvements, comme une lenteur dans le mouvement des membres (akinésie), une rigidité musculaire qui bloque les articulations, et des tremblements des mains et des pieds au repos. Ces troubles affectent également le visage, notamment les muscles liés à l'élocution. Les symptômes de la maladie apparaissent lorsque 70 % environ des neurones de la substance noire ont été détruits.

Quel effet ce traitement médicamenteux a-t-il sur le patient ?

A.-L.B. : Dans les minutes qui suivent la prise du médicament, les symptômes sont réduits. La situation du malade s'améliore, jusqu'à retrouver un état quasiment normal. C'est tellement efficace qu'on parle de « lune de miel » pour le malade. Mais au bout de plusieurs années de traitement, le malade commence à avoir des complications liées à l'administration répétée du

Ses dates clés

> 1987. Découverte des effets de la stimulation cérébrale profonde à haute fréquence sur la maladie de Parkinson.

> 1988-2006. Directeur de l'unité de recherche Inserm Neurobiologie préclinique.

> 1989-2005. Chef du service de neurochirurgie au CHU de Grenoble.

> 1993. Traitement du premier malade parkinsonien par stimulation cérébrale profonde.

> 2009. Lancement du projet de laboratoire Clinatec, à Grenoble.

> 2011. Le laboratoire Clinatec est opérationnel.

> 2014. Lauréat du prix Lasker.

> 2015. Lauréat du Breakthrough Prize.

traitement. En effet, chaque fois que le malade prend un comprimé, c'est comme si les récepteurs de la dopamine, situés au niveau des synapses des neurones, prenaient un coup de poing, et ils finissent par perdre leur souplesse de fonctionnement. Au bout de cinq à dix ans, en fonction de la personne et des doses de traitements, les récepteurs de la dopamine ne répondent plus de façon souple et harmonieuse, mais de façon binaire, en mode « on/off », comme un interrupteur. Quand ils sont « allumés », le traitement est efficace. À l'inverse, quand ils sont « éteints », le malade a des mouvements ralentis. Le traitement est alors modifié, et la prise des doses est de plus en plus rapprochée. Les malades tombent de Charybde en Scylla : l'intensification du traitement provoque l'apparition de dyskinésies, mouvements involontaires et incontrôlés, en période « on ». Et en période « off », les malades ont des rigidités et des blocages.

Faut-il alors penser à la stimulation cérébrale profonde ?

A.-L.B. : Oui, notamment la stimulation du noyau subthalamique. Elle supprime globalement l'ensemble des symptômes de la triade : tremblement, akinésie et rigidité. Au tout début, les effets de la stimulation électrique à haute fréquence sont aussi spectaculaires que les médicaments. Mais attention, ce traitement n'est pas indiqué à tous les patients. D'ailleurs, la réponse aux médicaments permet souvent de prédire la réponse à la stimulation.

Sait-on précisément comment la stimulation cérébrale profonde agit sur les neurones ?

A.-L.B. : Tout ce que l'on sait, c'est que cela marche… Mais on ne connaît pas les mécanismes. On sait que cette stimulation interfère beaucoup avec les circuits de neurones qui utilisent la dopamine et qu'elle ne crée pas de lésions ni de modification organique [3]. Tout le monde cherche à comprendre. Pour moi, toute une série de mécanismes agissent conjointement et simultanément. Il faut préciser que la stimulation électrique n'est pas un phénomène qui agit seulement tout au bout de la pointe de l'électrode… Elle a une action diffuse. Or dans ces zones du cerveau, il existe une grande variété de cellules : il y a des neurones de différentes catégories, qui fonctionnent avec différents types de neurotransmetteurs, des synapses, des fibres… Et nous, on arrive dans cette zone avec nos « orages électriques » ! Donc on influence beaucoup de choses. J'ai proposé qu'on parle d'inhibition fonctionnelle, car il est clair que les neurones qu'on stimule ne fonctionnent plus ensemble, donc ils semblent inhibés. Cameron McIntyre, de l'université Case Western Reserve à Cleveland, aux États-Unis, qui travaille beaucoup sur ces questions, parle de *« lésion informationnelle »* [4] : la stimulation interromprait le passage de signaux anormaux dans les noyaux cérébraux. Cela agirait comme un brouillage.

Quelle est la durée des effets bénéfiques de la stimulation cérébrale profonde ?

A.-L.B. : Si la stimulation est stoppée, les effets bénéfiques ne durent qu'une ou deux secondes ! La réversibilité est totale. C'est une des raisons du succès de la méthode. Cela a permis de cibler des zones réputées intouchables, comme le noyau subthalamique. Une hémorragie dans ce noyau provoque l'hémiballisme, mouvements anormaux involontaires de projection en avant de la racine des membres, très brusques, très épuisants ! Des cas de décès par épuisement ont été décrits… Ensuite, tant que la stimulation (bien réglée) est maintenue, les effets bénéfiques durent… Le problème est que nous agissons seulement sur les symptômes. Pendant ce temps, la maladie continue d'évoluer. D'autres circuits de neurones sont aussi atteints de dégénérescence, comme le système nerveux végétatif. Conséquence : des troubles digestifs, cardiaques, vésicaux apparaissent. Donc au fur et à mesure de la dégénérescence, on voit apparaître tout un cortège de symptômes nouveaux qui, eux, touchent des secteurs différents du corps et qui ne répondent ni à la pharmacologie, ni à la stimulation cérébrale à haute fréquence.

Le Saint Graal : empêcher les neurones producteurs de la dopamine de dégénérer

Jusqu'à présent, aucun traitement ne peut bloquer le développement de la maladie.

A.-L.B. : C'est le challenge. Plusieurs travaux de recherche sont menés pour trouver un traitement. En particulier de quoi empêcher les neurones producteurs de dopamine de dégénérer. Obtenir cet effet neuroprotecteur est devenu le Saint Graal des neurologues. Tout le monde cherche. Et il y a beaucoup de pistes, comme la thérapie génique. De notre côté, en 2010, nous avons découvert avec John Mitrofanis, de l'université de Sydney, quelque chose de très intéressant : l'illumination à l'aide de rayonnements proches de l'infrarouge.

De quoi s'agit-il ?

A.-L.B. : À l'instar de la stimulation électrique, nous utilisons un dispositif placé à l'intérieur du cerveau. Mais pour stimuler les neurones, cette technique diffuse des rayons proches de l'infrarouge, c'est-à-dire de la lumière dont la longueur d'onde est comprise entre 600 et >>>

« Les infrarouges redonnent de l'énergie aux neurones »

>>> 1 000 nanomètres. Nos travaux ont montré que l'exposition des neurones producteurs de dopamine à ce type de rayonnement stimule leur métabolisme.

Cela a-t-il été découvert fortuitement, comme la stimulation cérébrale profonde ?

A.-L.B : Non, la littérature scientifique nous a mis sur la piste. Des études ont montré les bénéfices de la lumière, notamment infrarouge, sur des états de stress et de souffrance cellulaire. Des collaborateurs de John Mitrofanis avaient ainsi réalisé des expériences sur des cultures de cellules soumises à diverses formes de stress ou d'inflammation. Sachant que les rayons proches de l'infrarouge peuvent pénétrer dans les tissus organiques jusqu'à près de 3 centimètres de profondeur, nous avons eu l'idée d'exposer des souris malades avec l'espoir qu'un rayonnement externe puisse agir à l'intérieur de leur cerveau.

Comment cette expérience a-t-elle été réalisée ?

A.-L.B. : Nous avons réalisé cette expérience sur des souris et leur avons injecté une toxine, le MPTP, qui s'attaque aux neurones dopaminergiques de la susbstance noire. Elles ont ainsi les mêmes symptômes que la maladie de Parkinson. Une partie de ces animaux a été exposée à des lampes diffusant un rayonnement proche de l'infrarouge. Résultat : nous nous sommes aperçus que les animaux exposés perdaient beaucoup moins de neurones dans la substance noire que les autres, entre 35 et 45 % [5]. Forts de ce résultat, nous nous sommes lancés dans une série d'expérimentations avec pour objectif d'accéder à une application chez l'homme.

Clinatec a pour objectif de créer des dispositifs biomédicaux innovants

Une source externe de rayonnement infrarouge est-elle capable d'atteindre la substance noire chez l'homme ?

A.-L.B. : Non, des rayons diffusés par une lampe externe ne pénètrent pas suffisamment en profondeur dans le cerveau pour que les deux substances noires soient exposées. Celles-ci sont à 10, 12 centimètres de profondeur, donc il nous a fallu imaginer comment procéder. C'est là que mon expérience de la stimulation électrique a servi. J'avais développé des techniques mini-invasives pour faire de la stimulation cérébrale en plein milieu du cerveau. Nous les avons donc utilisées chez la souris [6], puis chez le singe.

Quel est le dispositif technique ?

A.-L.B. : De façon schématique, nous leur implantons une fibre optique connectée à une source laser, elle-même connectée à une batterie qui est exactement la même que celle que nous utilisons pour la stimulation cérébrale profonde. La fibre est implantée en direction du troisième ventricule, une cavité située entre les deux hémisphères cérébraux, pile sur la ligne médiane, à hauteur des deux noyaux de la substance noire à droite et à gauche, qui comportent les cellules dopaminergiques. La cible n'est plus le noyau subthalamique, mais les substances noires.

Quels résultats obtenez-vous ?

A.-L.B. : Il y a quelques mois, nous avons obtenu les résultats d'une expérience de plusieurs semaines chez le singe, chez qui on provoquait la maladie avec le MPTP. Les animaux qui reçoivent correctement les infrarouges ont pratiquement un comportement identique à la normale, et on constate une perte neuronale très minime, voire nulle. C'est un résultat assez incroyable.

Toutefois, les neurones sont touchés par la toxine MPTP, pas par la maladie de Parkinson...

A.-L.B. : Certes, ce ne sont pas des malades, ce n'est pas la maladie de Parkinson. Mais le MPTP est un des modèles les plus utilisés pour modéliser la maladie. En outre, sachez que nous avons aussi lancé des expérimentations avec d'autres modèles mimant la maladie de Parkinson en espérant démontrer que, là aussi, on ralentit ou stoppe la perte neuronale. C'est peut-être le début d'une belle aventure scientifique !

Cette fois, savez-vous ce qui se produit dans les neurones de la substance noire ?

A.-L.B. : Oui, même s'il reste encore beaucoup de choses à comprendre, on a une meilleure explication du mécanisme par rapport à la stimulation cérébrale profonde. Nous savons depuis longtemps que la mort d'une cellule, et d'un neurone en particulier, est associée à une dégradation de leurs mitochondries, usines énergétiques des cellules. Or les mitochondries contiennent des enzymes, comme la cytochrome C oxydase, qui sont photosensibles. C'est un peu comme la chlorophylle chez les plantes, qui absorbe la lumière et fabrique de l'énergie. Dans le cas des mitochondries, la cytochrome C oxydase absorbe la lumière dans la bande du proche infrarouge. Ce phénomène stimule la chaîne de transport des électrons. Et cela augmente la production d'ATP, molécule qui fournit l'énergie nécessaire aux réactions chimiques du métabolisme des cellules. Autrement dit, le rayonnement infrarouge redonne de l'énergie aux neurones producteurs de la dopamine de la substance

noire, attaqués par la maladie. Cela les empêche de mourir. On a donc un effet neuroprotecteur.

Le dispositif utilisé chez l'animal est-il applicable à l'homme ?

A.-L.B. : Il faudra l'adapter. Sur le principe, le modèle est identique à celui que nous avons fabriqué. Mais la fibre optique sera plus longue, pour atteindre le fond du troisième ventricule d'un cerveau humain. Chaque matériau doit résister le plus longtemps possible aux contraintes du milieu organique. Et il faudra que le dispositif réponde de façon encore plus drastique aux normes de sécurité et de biocompatibilité. Le prototype utilisé chez l'animal a été fabriqué à Clinatec, à Grenoble, avec la collaboration du Leti, laboratoire du CEA spécialisé dans les micro et nanotechnologies. Actuellement, nous développons un dispositif qui soit utilisable chez l'homme, en espérant pouvoir prochainement débuter la phase d'un essai clinique.

Vous venez d'évoquer Clinatec. Présentez-nous ce laboratoire étonnant !

A.-L.B. : C'est la réalisation d'un rêve. Je voulais réunir dans une même unité de lieu, d'action et de temps des disciplines différentes pour avoir la meilleure conjonction entre les idées des uns et les compétences des autres. Au cours de ma carrière, à l'hôpital, au laboratoire, à la faculté de médecine, j'ai constaté que l'éloignement des structures induisait une viscosité et une lenteur dans les rapports humains qui découragent les tentatives de réalisation commune. Clinatec est né de ma rencontre avec Jean Therme, directeur du pôle Recherche technologique au CEA. Nous sommes convaincus que le rapprochement de la recherche médicale et technologique peut changer le destin de millions de malades, souffrant de maladies neurodégénératives, de cancers ou de tétraplégies. Clinatec permet ce rapprochement. Il rassemble des mathématiciens, des biologistes, des médecins, des ingénieurs, des techniciens, des animaliers, des administratifs… L'objectif : créer des dispositifs biomédicaux innovants, du concept fondamental jusqu'au traitement du malade. La sécurité du malade est une priorité.

Comment est équipé Clinatec ?

A.-L.B. : Clinatec a ouvert ses portes en 2011. C'est un bâtiment de 6 500 m² qui regroupe une plate-forme technique où sont conçus des dispositifs technologiques de pointe, une animalerie pour réaliser les essais précliniques et un secteur clinique de six chambres doté des meilleurs équipements. Il contient un vaste bloc opératoire équipé de robots pilotés depuis une salle de commande adjacente, d'une puissante IRM qui peut être déplacée sur le champ opératoire et réaliser des images du cerveau durant une opération ou une injection de médicament. Le premier malade souffrant d'une tumeur au cerveau a été opéré en octobre 2013. Il s'agit d'un lieu unique en France.

CLINATEC

Le laboratoire Clinatec, à Grenoble, développe le projet d'un exosquelette baptisé EMY, piloté par la pensée, pour aider les tétraplégiques.

Quels sont les grands projets en cours ?

A.-L.B. : L'un des plus ambitieux est le développement d'un exosquelette piloté par la pensée pour les tétraplégiques. Ce projet BCI (« brain-computer interface ») associe deux implants mesurant l'activité du cortex, des algorithmes interprétant les signaux cérébraux relatifs aux intentions de mouvements, et l'exosquelette pesant 70 kg, batteries et ordinateurs inclus, baptisé EMY (Enhancing MobilitY). Ces éléments ont été testés et approuvés par la réglementation française en matière de dispositifs médicaux. Un dossier de demande d'essai clinique a été déposé il y a quatre mois auprès de l'Agence nationale de sécurité du médicament et des produits de santé et du Comité de protection des personnes. Une fois le feu vert obtenu, nous serons prêts à effectuer des essais chez l'homme. Le développement d'outils miniaturisés pour relever des empreintes moléculaires et cellulaires de tumeurs cancéreuses, ou pour délivrer des médicaments au cœur de ces tumeurs, est aussi en cours.

Miniaturisation, robotisation, cerveau… vos recherches ne suscitent-elles pas de faux espoirs ou à l'inverse de la défiance ?

A.-L.B. : Bien sûr, le développement de Clinatec a fait l'objet de certaines oppositions. Et on m'a accusé de faire du « transhumanisme »… Un terme très à la mode. Mais je n'ai qu'une ambition, celle d'être au service des malades et d'améliorer leur quotidien. En aucun cas nous ne cherchons à transformer les humains. Nos travaux se font dans le respect des nombreuses réglementations, avec l'aval des organismes de contrôle. Que les nouvelles technologies suscitent des débats éthiques, des interrogations de la part de la société, est parfaitement normal. Clinatec n'est pas une tour d'ivoire. Mais si nous avons reçu des messages de crainte, nous avons également reçu des demandes de participation de la part de malades. Là aussi, il faut rester prudent. Ne pas promettre de solution miracle. ■

[1] A.-L. Benabid *et al., Appl. Neurophysiol., 50,* 344, 1987.
[2] P. Limousin *et al., Lancet, 345,* 91, 1995.
[3] P. Krack *et al., N. Engl. J. Med., 349,* 1925, 2003.
[4] A. Chaturvedi *et al., J Neural Eng.,* doi: 10.1088/1741-2560/10/5/056023, 2013.
[5] V. Shaw *et al., The Journal of Comparative Neurology, 518,* 25, 2010.
[6] C. Moro *et al., Journal of Neurosurgery, 120,* 670, 2014.

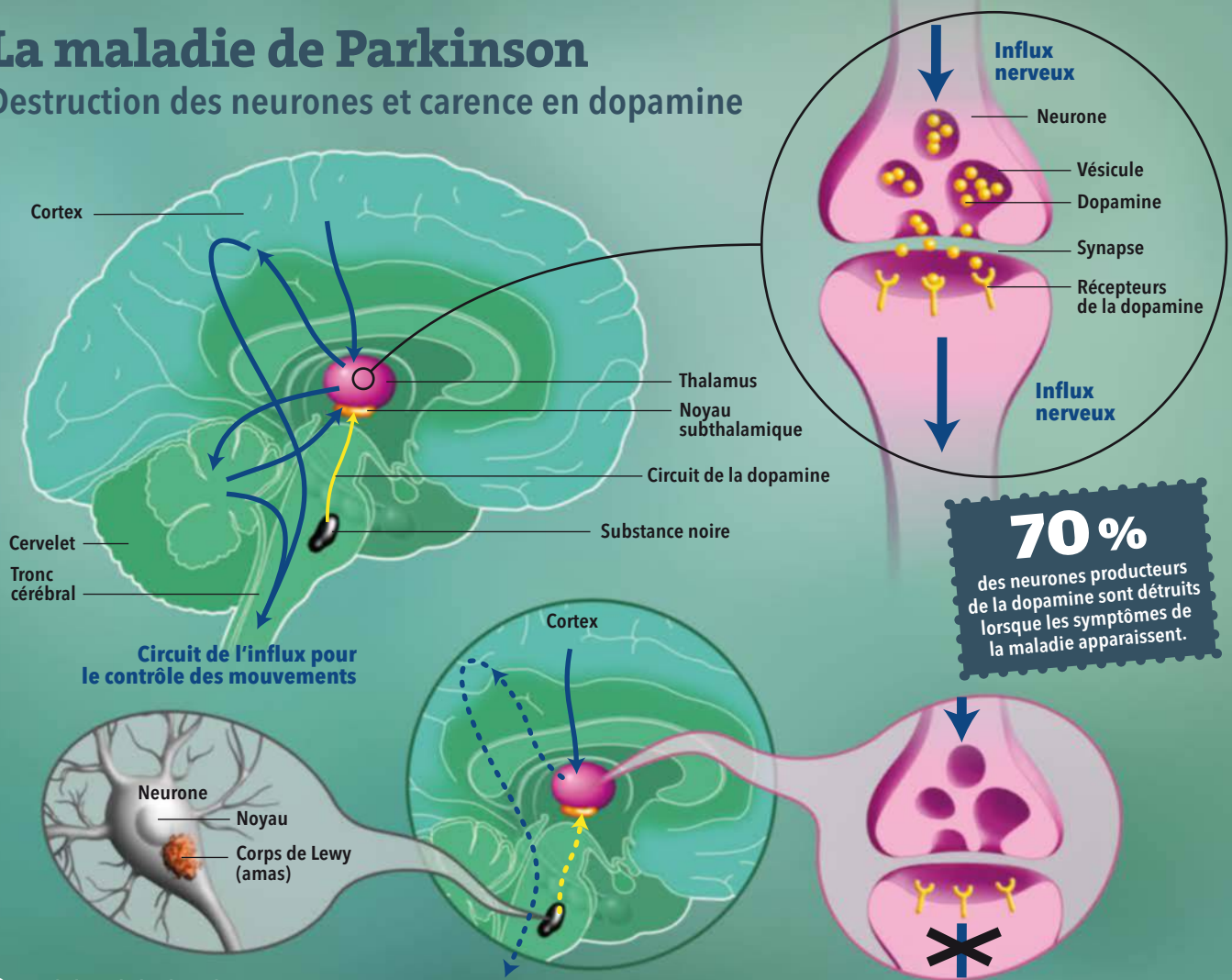
2 • Des mouvements sous contrôle

TEXTE : MATHIAS GERMAIN
INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

La maladie de Parkinson touche 150 000 personnes en France. Due à la destruction des neurones producteurs de dopamine, elle entraîne des dysfonctionnements moteurs. Deux traitements atténuent les symptômes : la dopathérapie et la stimulation cérébrale profonde.

La maladie de Parkinson

Destruction des neurones et carence en dopamine



70 % des neurones producteurs de la dopamine sont détruits lorsque les symptômes de la maladie apparaissent.

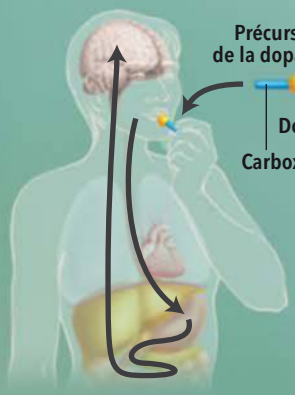
❶ Lors de la maladie de Parkinson, l'alpha-synucléine, protéine devenue anormale, s'accumule dans les neurones producteurs de la dopamine, situés dans la substance noire. Cette protéine forme des amas, appelés corps de Lewy, qui provoquent leur dégénérescence.

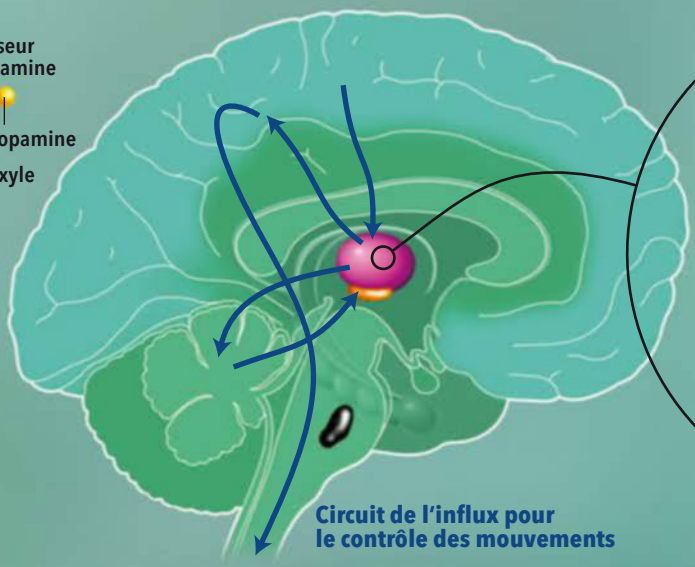
❷ Cette dégénérescence entraîne une baisse de la production de la dopamine, qui n'est plus acheminée en assez grande quantité vers les neurones utilisateurs. Ceux-ci sont situés dans les zones impliquées dans le contrôle des mouvements (comme le thalamus, le noyau subthalamique).

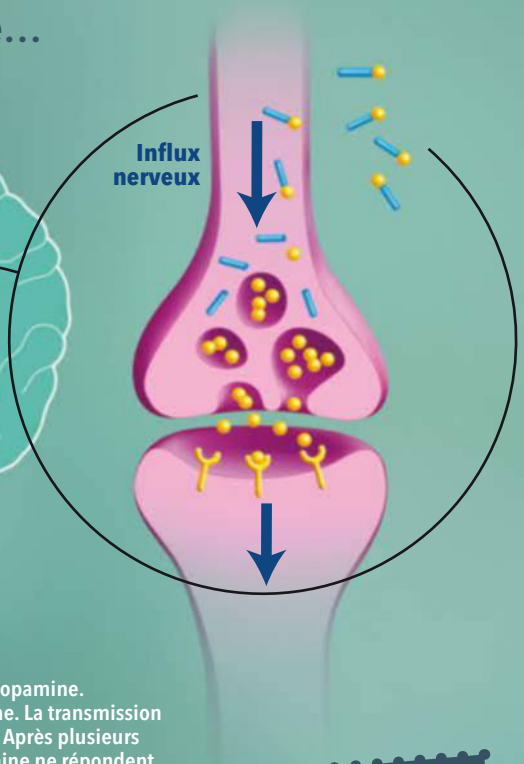
❸ L'influx nerveux n'est plus correctement transmis par ces neurones. Cela provoque une lenteur des mouvements (akinésie), une rigidité musculaire, qui bloque les articulations, et des tremblements des mains et des pieds au repos.

Les traitements

La dopathérapie compense le manque de dopamine…





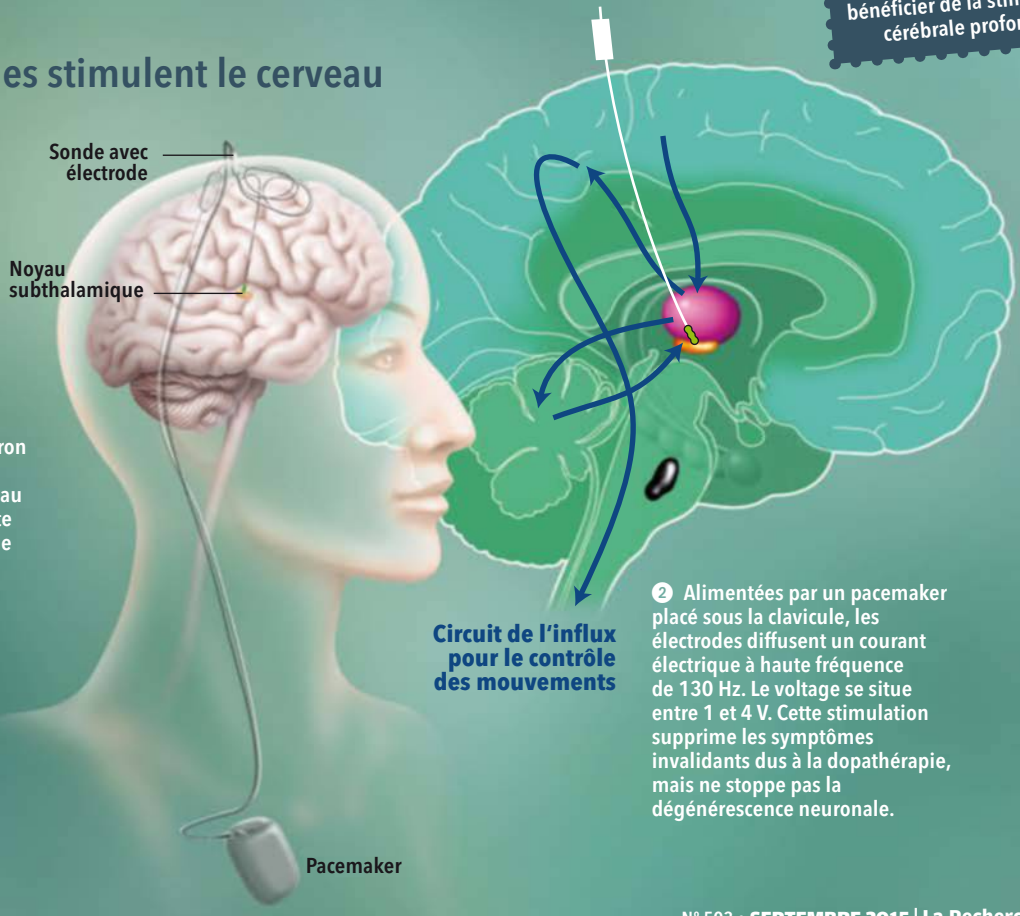


❶ Le malade reçoit par oral un précurseur de la dopamine capable de passer la barrière hémato-encéphalique, filtre protecteur du cerveau.

❷ Une fois dans le cerveau, une enzyme sépare le carboxyle de la dopamine. Les neurones des noyaux centraux peuvent alors utiliser la dopamine. La transmission de l'influx nerveux est rétablie et le malade n'a plus de symptômes. Après plusieurs années de traitement, les synapses des neurones utilisant la dopamine ne répondent plus que par intermittence. Cela déclenche de nouvelles complications motrices. La stimulation cérébrale profonde peut alors être indiquée.

15 %
des malades traités par dopathérapie peuvent bénéficier de la stimulation cérébrale profonde.

… Des électrodes stimulent le cerveau



❶ On implante, dans le cerveau du malade, deux électrodes à environ 10 cm de profondeur, en général dans le noyau subthalamique, à droite et à gauche, grâce à une opération chirurgicale.

❷ Alimentées par un pacemaker placé sous la clavicule, les électrodes diffusent un courant électrique à haute fréquence de 130 Hz. Le voltage se situe entre 1 et 4 V. Cette stimulation supprime les symptômes invalidants dus à la dopathérapie, mais ne stoppe pas la dégénérescence neuronale.

3 • S'attaquer aux protéines folles

Une seule protéine serait à l'origine de plusieurs maladies, dont celle de Parkinson. Son pouvoir pathogène serait dû à la façon dont elle se replie dans l'espace.

PAR **Anne Debroise,**
journaliste.

La maladie de Parkinson est-elle une maladie à prion ? La question a été discutée lors du dernier Congrès international de la maladie de Parkinson et des troubles du mouvement, qui se tenait mi-juin 2015 à San Diego, en Californie. La dernière décennie de recherche a en effet montré le rôle essentiel joué par une protéine, l'alpha-synucléine, dont le comportement exhibe d'évidentes parentés avec celui des prions impliqués dans la maladie de Creutzfeldt-Jakob et la maladie de la vache folle. Comme eux, l'alpha-synucléine adopte des formes géométriques capables de s'agréger, formant des dépôts qui ravagent le cerveau des malades. Ce modèle vient de recevoir une très sérieuse confirmation de la part de l'équipe de Ronald Melki, de l'Institut des neurosciences Paris-Saclay. En mai dernier, elle montrait que la protéine alpha-synucléine peut former différents dépôts selon la conformation qu'elle adopte dans l'espace. Et que chacun de ces dépôts génère des lésions caractéristiques d'un type particulier de syndrome parkinsonien [1]. Un modèle qui ouvre la voie, enfin, à la conception de nouveaux traitements.

La maladie de Parkinson touche 1 % des plus de 65 ans, soit 150 000 personnes en France. Elle affecte essentiellement les personnes âgées, même si certaines formes apparaissent de manière précoce chez les moins de 50 ans. Les malades souffrent d'un ralentissement de leurs mouvements, qui deviennent plus rigides et peuvent, dans 30 % des cas, s'accompagner de tremblements. Mais le diagnostic déterminant de la maladie de Parkinson ne peut être porté que *post mortem*. L'examen du cerveau des patients révèle alors la disparition d'une grande quantité de neurones particuliers : ils synthétisent la dopamine. On note également la présence, à l'intérieur de ces neurones dopaminergiques encore en place, de dépôts fibreux appelés corps de Lewy.

Une molécule naturellement présente. Parce qu'ils ne disposent pas d'un modèle solide pour décrire le processus de la maladie, les médecins n'ont pas les moyens, aujourd'hui, de stopper cette dégénérescence neuronale. Une première lueur a percé en 1997, quand Maria Grazia Spillantini, à l'université de Cambridge, au Royaume-Uni, a mis un nom sur le constituant principal de ces dépôts fibreux : il s'agit de l'alpha-synucléine, une protéine naturellement présente dans le cerveau.

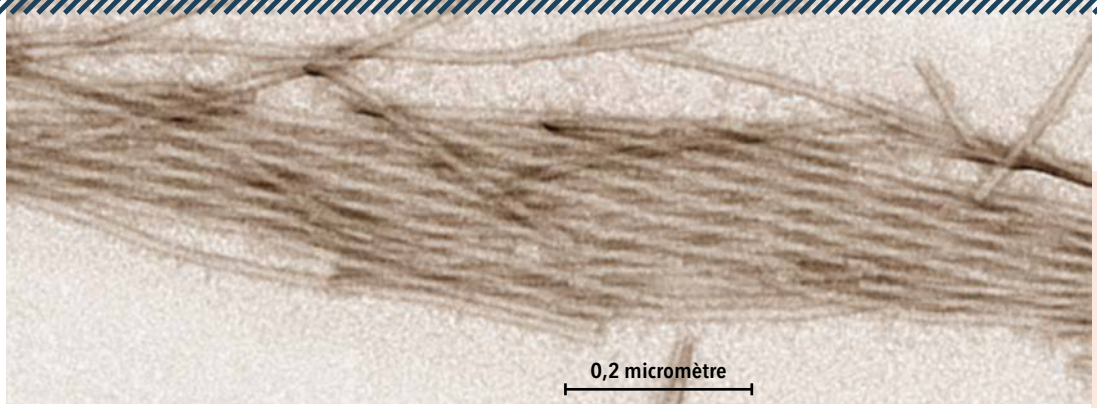
« *L'alpha-synucléine régulerait la communication entre les neurones. Elle est exprimée au niveau des synapses et plus précisément à l'extrémité pré-synaptique des neurones,* explique Sreeganga Chandra, spécialiste de cette protéine à l'université Yale, aux États-Unis. *Elle s'y trouve sous forme soluble, mais peut adopter de nombreuses conformations dans l'espace. Nous pensons que cela lui permet de courber la membrane neuronale, de manière à former des vésicules dans lesquelles transitent les neurotransmetteurs fabriqués par les neurones.* » *In vitro*, les alpha-synucléines peuvent se lier les unes aux autres. Elles forment alors des oligomères, qui s'assemblent en polymères gigantesques.

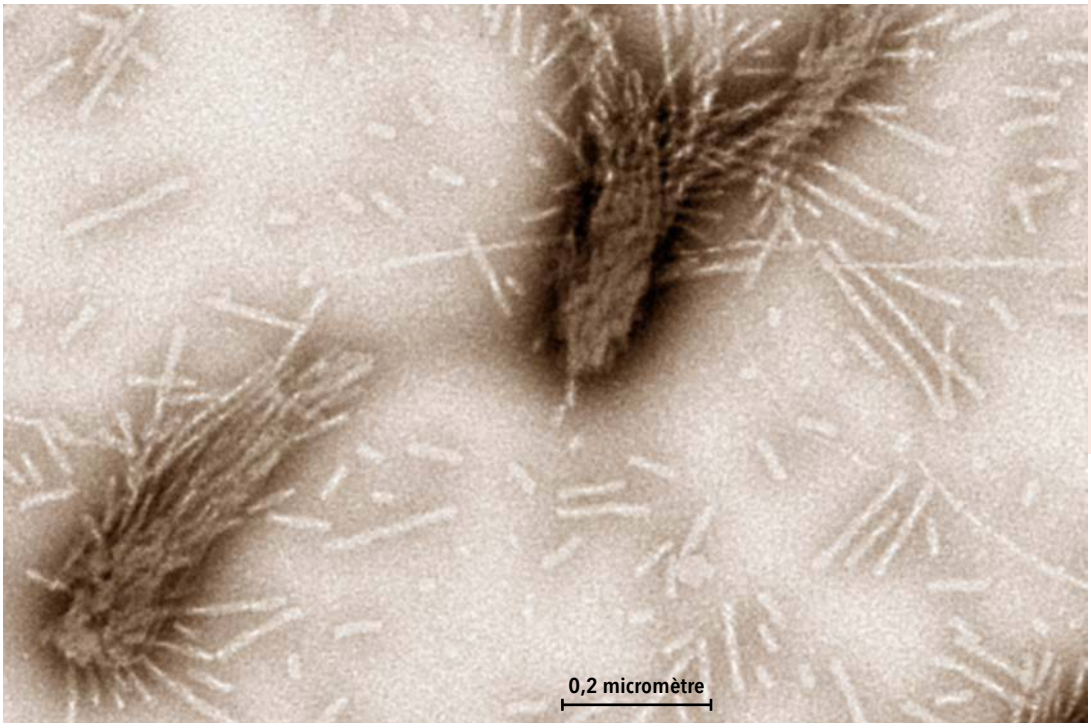
L'essentiel

> LA MALADIE DE PARKINSON est provoquée par un agrégat de protéines toutes identiques, contenues dans les neurones : les alpha-synucléines.

> UNE ÉQUIPE FRANÇAISE vient de montrer que seule une forme précise de cette protéine provoque la mort neuronale.

> PLUSIEURS PISTES de traitement se fondent sur la neutralisation de cette protéine délétère.





LUC BOUSSET/CNRS

Ces amas d'alpha-synucléine, protéine naturellement présente dans le cerveau, sont à l'origine de la maladie de Parkinson. Leur observation au microscope électronique révèle leurs différentes formes. Dans les neurones, ces amas provoquent leur dégénérescence.

Ce sont ces agrégats qui constituent, en grande partie, les corps de Lewy.

L'alpha-synucléine est rapidement devenue le centre des préoccupations des chercheurs travaillant non seulement sur la maladie de Parkinson, mais aussi sur d'autres maladies dans lesquelles elle joue un rôle, et que l'on englobe désormais sous le vocable de « synucléinopathies » : la démence à corps de Lewy (caractérisée par l'accumulation de corps de Lewy à l'intérieur des neurones), ou l'atrophie multisystématisée (une dégénérescence motrice dans laquelle les agrégats touchent plutôt les cellules gliales du cerveau, qui environnent les neurones et les soutiennent).

À l'université Goethe de Francfort, Heiko Braak a aussi identifié au début des années 2000 des dépôts d'alpha-synucléine en dehors du cerveau [2]. L'examen minutieux de centaines de cerveaux de personnes décédées lui permet d'émettre l'hypothèse que les corps de Lewy apparaissent d'abord dans le système nerveux situé au niveau de l'intestin, avant d'atteindre le tronc cérébral et les neurones du bulbe olfactif, dans le cerveau. À partir de ces points d'ancrage, ils parviendraient aux neurones dopaminergiques de la substance noire (une zone au centre du cerveau impliquée dans l'apprentissage) et, plus tard, au cortex cérébral (lire « Des mouvements sous contrôle », p. 34). Les premières étapes sont silencieuses. En effet, lorsque les premiers symptômes (perte d'odorat puis troubles moteurs) apparaissent, plus de 70 % des terminaisons des neurones à dopamine sont déjà détruites. Ces symptômes s'aggravent à mesure que la dégénérescence gagne du terrain dans le cerveau. Une évolution qui s'étale souvent sur plus de vingt ans.

Cette progression évoque curieusement une infection. Pourtant, l'agent responsable échappait encore aux chercheurs : aucune bactérie, ni aucun virus ne semblait associé aux corps de Lewy. Or dans les années 1990, le scandale de la vache folle et celui des hormones de croissance éclatèrent. Il portèrent le projecteur sur une nouvelle forme d'agent infectieux : le prion. Il s'agit d'une protéine naturellement produite par l'organisme. Cette dernière est capable d'adopter des >>>

S'attaquer aux protéines folles

››› conformations différentes, des repliements qui la conduisent à s'accumuler à l'intérieur de neurones, et de les détruire, provoquant chez l'homme la maladie de Creutzfeldt-Jakob. L'alpha-synucléine se comporterait-elle ainsi ? Serait-elle responsable de la maladie ou un simple déchet de la dégénérescence neuronale ?

Les partisans d'un comportement de type prion disposaient, dès 1997, d'un argument fort : les formes précoces de la maladie sont en effet associées à des altérations du gène de l'alpha-synucléine [3]. Il peut s'agir de mutations ou de la présence du gène en deux ou trois exemplaires, qui provoque une surexpression de l'alpha-synucléine dans les neurones. Les symptômes sont plus sévères dans les cas de triplement du gène que lors de sa duplication.

Les accusations suivantes furent portées par des travaux *in vitro*, qui montrèrent que les oligomères d'alpha-synucléine se lient aux membranes cellulaires. Ce faisant, ils augmentent leur perméabilité et provoquent la mort de la cellule. Mais pour démontrer la toxicité des agrégats, encore fallait-il pouvoir isoler un type d'agrégat bien défini, avant de l'inoculer et de mesurer ses effets. Or « *comme toutes les protéines, l'alpha-synucléine est capable d'adopter des milliers de conformations différentes dans l'espace, selon le milieu dans lequel elle est plongée. Et les agrégats testés jusqu'ici étaient en réalité des mélanges mal définis* », explique Ronald Melki.

Différents agrégats pour différentes maladies. Le biochimiste, spécialiste des prions, s'attaque donc à ce problème. En 2013, il montre [4] que l'on peut obtenir plusieurs types d'agrégats homogènes d'alpha-synucléine en contrôlant rigoureusement plusieurs paramètres de la polymérisation : salinité, température, présence d'ions calcium, etc. Avec son équipe, il parvient à caractériser deux types d'agrégats : les premiers forment des fibres (ressemblant à des spaghettis), les seconds des rubans [Fig.1]. Il émet l'hypothèse que ces différents agrégats sont à l'origine de synucléinopathies différentes et entreprend de la vérifier *in vivo* sur des animaux.

Il fait appel pour cela à l'équipe de Veerle Baekelandt à Louvain, en Belgique, qui travaille sur des rats produisant une quantité

« Nous sommes à un tournant »

LA MALADIE DE PARKINSON est l'une des rares affections neurologiques correctement traitées par les neurologues. La dopathérapie et la stimulation cérébrale profonde permettent de diminuer significativement la sévérité des symptômes. Ces traitements fonctionnent bien, au point qu'un parkinsonien, même s'il souffre de sa maladie et des effets secondaires des traitements, vit aussi longtemps qu'un non-parkinsonien. On cherche aujourd'hui à les améliorer et à réduire les effets secondaires de la lévodopa, qui provoque notamment l'apparition de mouvements involontaires.

DR

Erwan Bezard dirige l'équipe physiopathologie des syndromes parkinsoniens à l'Institut des maladies neurodégénératives de l'université de Bordeaux
- **s'intéresse aux mécanismes responsables de l'hypokinésie, diminution de l'activité motrice, dans les syndromes parkinsoniens**
- **cherche aussi à diminuer les effets secondaires induits par le traitement de référence, la lévodopa.**

MAIS AU-DELÀ DE CES APPROCHES SYMPTOMATIQUES, le nouveau modèle de maladie de Parkinson permet d'envisager de changer le cours de la maladie, en développant des traitements neuroprotecteurs capables de stopper sa progression. Je pense que nous sommes réellement à un tournant, grâce à une meilleure connaissance des mécanismes menant à la mort cellulaire. Mais c'est un tournant qui prendra des années à

d'alpha-synucléine plus importante que la normale. Ils injectent dans leur cerveau des agrégats d'alpha-synucléine, de type « fibrille » ou « ruban », marqués par fluorescence pour pouvoir suivre leur devenir. Quatre mois après l'injection, de nombreux animaux montrent des signes de ralentissement moteur. Les animaux sont alors sacrifiés et leur cerveau examiné. L'imagerie cérébrale montre que les corps de Lewy ont envahi de nombreux neurones, mais aussi que les formes fibrillaires ont provoqué la mort de nombre d'entre eux. Il confirme ainsi que certains agrégats d'alpha-synucléine sont toxiques, *in vivo*, pour les neurones. La protéine serait donc bien, comme le prion, une protéine dont certaines conformations s'avèrent pathologiques.

Mais ce n'est pas tout : les chercheurs observent que les agrégats de type « fibrille » provoquent des profils de lésions caractéristiques de la maladie de Parkinson, alors que ceux de type « ruban » évoquent l'atrophie multisystématisée. Différents agrégats conduiraient donc à différentes synucléinopathies. Ce travail valide le modèle de la maladie de Parkinson qui avait commencé »»»

DR

Ronald Melki (à gauche) et son collaborateur Luc Bousset, de l'Institut des neurosciences Paris-Saclay, ont découvert les formes de l'alpha-synucléine à l'origine de la maladie de Parkinson.

se concrétiser : les premières pistes mettront de cinq à dix ans avant d'émerger, et les essais cliniques dureront encore sans doute une dizaine d'années.

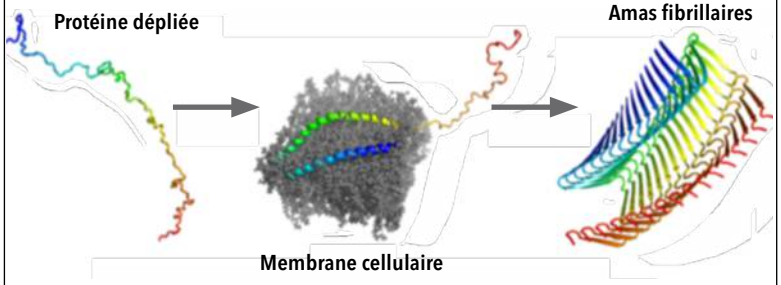
IL EST DIFFICILE AUJOURD'HUI DE PRÉDIRE laquelle de ces pistes va aboutir. Il est d'ailleurs fort probable que l'on utilisera un mélange des nombreuses pistes de traitement qui s'offrent à nous. La cible est désormais l'alpha-synucléine, qu'elle soit sous forme libre, sous forme d'oligomère, ou d'agrégats. La première piste vise à tenter de diminuer la production de l'alpha-synucléine dans les neurones. Il s'agirait d'une forme de thérapie génique, consistant à ingérer des substances bloquant l'expression de cette protéine. On peut aussi envisager d'augmenter sa dégradation, en boostant l'activité de catalyse interne aux neurones. Une troisième piste cible de manière plus spécifique les agrégats d'alpha-synucléine, soit en empêchant leur formation, en bloquant le processus de recrutement des formes libres qui viennent grossir les agrégats, ou bien en dissolvant, de manière chimique, les dépôts. Une autre voie de recherche consiste à empêcher le déplacement de ces oligomères ou des agrégats, pour éviter qu'ils ne se propagent d'un neurone à l'autre et envahissent ainsi des zones importantes du cerveau.

On dispose d'anticorps dirigés contre les oligomères, ils pourraient peut-être capter ces espèces en circulation. Cette approche explore donc la possibilité de vacciner les personnes contre les dépôts d'alpha-synucléine, une stratégie qui est déjà testée pour la maladie d'Alzheimer.

CES QUATRE PISTES PRINCIPALES sont poursuivies par la recherche publique et par l'industrie. Les deux premiers essais cliniques ont été lancés il y a peu par deux sociétés, une autrichienne (Affiris) et une américaine (Prothena). Prothena teste, depuis avril 2014, la capacité d'un anticorps à diminuer le taux d'alpha-synucléine libre dans le sang. Affiris teste, quant à elle, la réaction de patients à des vaccinations anti-alpha-synucléine. »»

■ **Propos recueillis par Anne Debroise**

Fig.1 L'alpha-synucléine s'assemble en fibrilles



LA PROTÉINE ALPHA-SYNUCLÉINE a, au départ, une longue forme dépliée. Puis, à la suite de son passage par la membrane cellulaire d'un neurone, la molécule acquiert la capacité de s'agréger à d'autres alpha-synucléines pour former des amas fibrillaires. RONALD MELKI/CNRS

>>> à émerger il y a vingt ans. « *Dans le cerveau sain, des milliers de conformations d'alpha-synucléine cohabitent,* expose Ronald Melki. *Mais à un moment donné, un certain déséquilibre conduirait à l'agrégation de certaines de ces conformations. Pour rétablir l'équilibre, certaines protéines alentour adopteraient alors la conformation capable de s'agréger, qui s'agrègerait à son tour, alimentant une réaction en chaîne.* » Quel type de déséquilibre pourrait déclencher la maladie ? « *On peut en envisager de nombreux : la présence d'une grande quantité d'alpha-synucléine, à cause d'une duplication du gène, ou bien une inflammation, ou encore l'ingestion de pesticides, car on sait que les agriculteurs sont surreprésentés parmi les parkinsoniens.* »

Vers un diagnostic précoce. La propagation de la maladie, à la suite de cet événement déclencheur, a été observée [5] fin 2014 par Gabor Kovacs dans son laboratoire de l'université médicale de Vienne, en Autriche. Il a pour cela utilisé des anticorps fluorescents, développés par la société allemande Roboscreen, capables de se lier spécifiquement aux agrégats d'alpha-synucléine. « *Nous avons vu ainsi les agrégats se propager. Ils apparaissent d'abord au niveau des connections synaptiques, là où s'exprime l'alpha-synucléine, puis dans le corps des neurones, vers les axes et les dendrites, puis passent aux cellules voisines au fur et à mesure de la progression de la maladie* », témoigne-t-il. Mais difficile de dire aujourd'hui comment les agrégats « recrutent » les molécules solubles.

Et quels dommages causent-ils ? « *Il est probable que les agrégats s'accumulent à l'intérieur des lysosomes*, les organites qui traitent les déchets de la cellule. Et comme ces lysosomes sont incapables de les digérer, les agrégats finissent par empêcher le fonctionnement normal du neurone, ce qui provoque sa mort.* » Une sorte de mort par étouffement à laquelle certains neurones (notamment les neurones à dopamine de la substance noire) seraient plus sensibles que d'autres.

Ce modèle permet de mieux comprendre la maladie. Mais il explique aussi la variété des troubles observés selon les patients. Il n'y aurait pas une maladie de Parkinson, mais des maladies de Parkinson, dont les ravages seraient différents selon le type d'agrégats formés. Ces maladies de Parkinson ne seraient qu'un type de synucléinopathie, comme la démence à corps de Lewy et l'atrophie multisystématisée. Elles-mêmes feraient partie, comme la maladie d'Alzheimer, de Creutzfeldt-Jakob et de Huntington, des « protéinopathies » : des maladies neurologiques liées au dépôt d'agrégats de protéines à l'intérieur ou à l'extérieur des cellules. Quant à savoir si ces protéinopathies pourraient toutes êtres considérées comme des maladies à prion... « *Je ne m'y risquerais pas* », annonce pour sa part Sreeganga Chandra. « *À moins de considérer que les synucléinopathies sont des maladies à prion très peu infectieuses, très lentes et peu virulentes...* », avance Erwan Bezard, de l'Institut des maladies neurodégénératives de l'université de Bordeaux (lire « Nous sommes à un tournant », p. 38).

Le grand intérêt de ce modèle consiste à offrir de nouvelles pistes de diagnostic et de traitement. Le diagnostic ne peut être porté aujourd'hui que *post mortem*. Mais puisque les agrégats d'alpha-synucléine en sont les principaux témoins, on peut envisager de les détecter. Cette protéine est présente dans le liquide cérébro-spinal des patients, dans lequel baigne le cerveau et la moelle épinière, mais celui-ci n'est pas accessible facilement. En revanche, l'expérience de Ronald Melki a montré que l'injection d'agrégats fibrillaires d'alpha-synucléine dans le sang des rats conduit à des dépôts dans les neurones du cerveau. Si les polymères d'alpha-synucléine passent du sang vers le cerveau, il y a fort à parier qu'ils sont présents dans le sang des malades, et que l'on peut les y détecter.

Le diagnostic précoce constitue la première étape avant d'envisager d'arrêter la progression de la maladie, qui représente désormais l'enjeu principal des recherches sur la maladie de Parkinson. Ronald Melki travaille par exemple sur des molécules chaperonnes capables de recouvrir la surface des agrégats et les empêcheraient de recruter de nouvelles molécules. Mais le modèle qu'il vient de confirmer offre de nombreux autres points d'attaque de cette dégénérescence neuronale, ainsi que des autres protéinopathies. ■

[1] W. Peelaerts *et al.*, *Nature*, doi : 10.1038/nature14547, 2015.
[2] H. Braak *et al.*, *Neurobiology of Aging, 24*, 197, 2003.
[3] M.H. Polymeropoulos *et al.*, *Science, 276*, 2045, 1997.
[4] L. Bousset *et al.*, *Nature communication*, doi : 10.1038/ncomms3575
[5] G. Kovacs GG *et al.*, *Neurobiol Dis., 69*, 76, 2014.

*LES LYSOSOMES sont des vésicules qui traitent les déchets dans le cytoplasme de la cellule.

4 • Soigner avec des gènes

Permettre aux neurones utilisateurs de dopamine d'en devenir des producteurs, c'est l'espoir offert par la thérapie génique. Un essai clinique encourageant a été réalisé chez quinze malades.

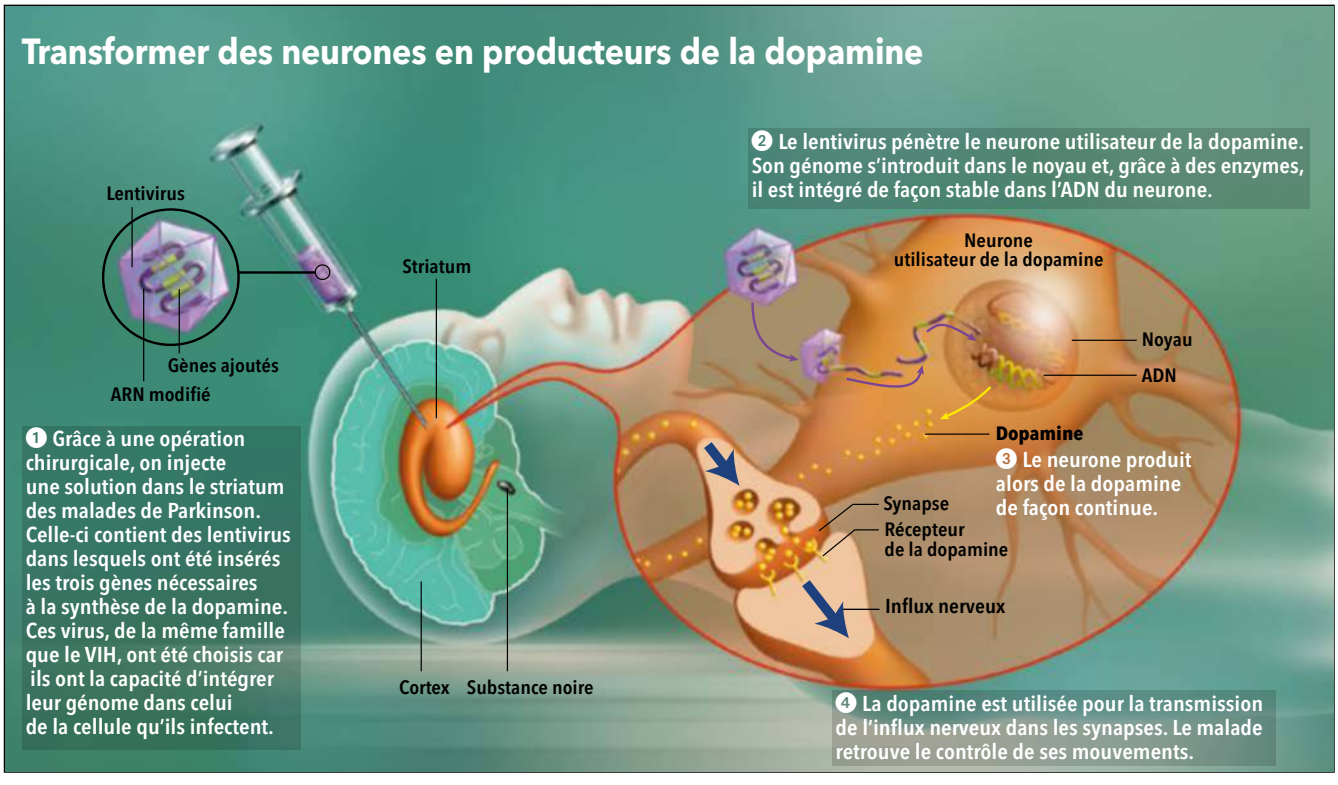
PAR **Mathias Germain,**
journaliste.

Remplacera-t-on un jour le traitement médicamenteux quotidien des malades de Parkinson par une unique opération de thérapie génique ? En France et en Angleterre, quinze malades, âgés de 48 à 65 ans, ont bénéficié de cette nouvelle stratégie et ils ont vu leurs symptômes moteurs s'atténuer [1]. La maladie de Parkinson est une dégénérescence des neurones qui fabriquent la dopamine, neurotransmetteur essentiel pour les circuits cérébraux qui contrôlent le mouvement. Le déficit de dopamine est à l'origine de troubles moteurs de plus en plus sévères : tremblements, rigidité des membres, diminution des mouvements corporels... Le principal traitement consiste à prendre des médicaments mimant l'action de la dopamine manquante dans le cerveau (lévodopa ou L-dopa), mais ceux-ci entraînent au fil du temps des effets indésirables importants, tels que des mouvements anormaux involontaires. *« Ils sont aussi invalidants que les symptômes présents avant le traitement médicamenteux,* explique Stéphane Palfi, neurochirurgien à l'hôpital Henri-Mondor, à Créteil, et auteur d'un essai de thérapie génique. *Ces effets indésirables résulteraient principalement de l'administration orale et discontinue de L-dopa, qui entraînerait des pics de concentration dans le cerveau.* » C'est à ce stade que la thérapie génique a été proposée.

Le principe ? Cette stratégie consiste à introduire dans les neurones privés de dopamine les trois gènes impliqués normalement dans la production du neurotransmetteur. Il s'agit des gènes codant trois enzymes nécessaires à la synthèse de dopamine. La machinerie cellulaire se met alors à les décoder et à produire le précieux >>>

[1] S. Palfi *et al.*, *The Lancet, 383,* 1138, 2014.

Transformer des neurones en producteurs de la dopamine



INFOGRAPHIE : SYLVIE DESSERT

L'essentiel

> UN ESSAI CLINIQUE DE THÉRAPIE GÉNIQUE a donné des résultats encourageants contre les symptômes de Parkinson.

> LA TECHNIQUE consiste à intégrer les trois gènes clés de la synthèse de dopamine dans les neurones par l'intermédiaire d'un virus.

> LES NEURONES TRAITÉS peuvent alors produire la dopamine qui leur manque.

>>> neurotransmetteur. « *Cette stratégie permet d'avoir un apport local et continu de dopamine* », souligne Stéphane Palfi. Pour transporter ces gènes dans les neurones, les biologistes utilisent un virus. L'équipe de Stéphane Palfi a choisi un lentivirus, un virus à ARN, qui a la capacité de transporter plusieurs gènes et surtout de les intégrer dans le génome de la cellule hôte. « *Cette famille de virus dispose en effet d'une enzyme, la transcriptase inverse, qui transcrit l'ARN du virus en brin d'ADN et l'insère dans le génome de la cellule hôte* », explique Stéphane Palfi. Le protocole consiste donc à préparer le lentivirus : le rendre inoffensif et lui intégrer les trois gènes. Ensuite, les virus modifiés sont injectés précisément dans le striatum du malade, zone cérébrale située sous le cortex, impliquée dans le contrôle des mouvements. L'injection dans le striatum de chaque hémisphère nécessite un guidage en imagerie stéréotaxique.

Pas d'effet indésirable sérieux. Après une série de tests *in vitro* puis chez l'animal, un essai chez quinze patients souffrant depuis au moins cinq ans de la maladie de Parkinson et présentant les complications motrices classiquement observées avec le traitement médicamenteux, a été réalisé dans les hôpitaux Henri-Mondor et Addenbrooke, à Cambridge, au Royaume-Uni. Tous les patients étaient sur pied dans les 24 heures suivant la chirurgie et ont quitté l'hôpital une semaine après l'intervention. « *Avec ce premier essai chez l'homme, nous avons démontré que le transfert des gènes est bien toléré : il n'y a pas eu de réponse inflammatoire ni d'effet indésirable sérieux* », indique Stéphane Palfi.

Les analyses génomiques des échantillons d'urine et de sang des personnes traitées ont permis de constater qu'il n'y avait pas de traces de multiplication inattendue des lentivirus dans l'organisme. « *Surtout, nous avons rétabli une fabrication continue du neurotransmetteur décisif pour le contrôle de la motricité* », ajoute-t-il. Les évaluations des symptômes à partir de l'échelle UPDRS* ont montré qu'ils ont été atténués jusqu'à douze mois après l'administration de la thérapie génique chez tous les patients, voire au moins stabilisés jusqu'à trois ans chez les premiers à avoir été opérés. Et six mois après l'injection, les examens d'imagerie médicale, en utilisant comme traceur radioactif un antagoniste des récepteurs de la dopamine, ont permis de constater que les neurones du striatum larguaient de la dopamine dans les synapses. « *Il faut noter que le bénéfice semble augmenter avec l'accroissement de la dose* », insiste le neurochirurgien. Car dans cet essai, les malades ont été répartis en trois groupes. Chacun a reçu une unique injection, mais les trois groupes ont eu un dosage différent de particules virales : le plus faible était à 1,9 × 10^7 TU*, le moyen à 4 × 10^7 TU et le plus fort à 1 × 10^9 TU. Et même à la dose la plus élevée, les malades ont dû garder leur traitement oral de lévodopa, qui a été réduit pour éviter le surdosage.

Amélioration du vecteur viral. D'autres essais chez un nombre plus élevé de malades seront nécessaires. S'ils sont concluants, cette thérapie génique pourrait être alors proposée aux patients chez qui le traitement par lévodopa oral commence à entraîner des effets secondaires. « *Notre objectif, raisonnable compte tenu des résultats déjà obtenus, serait de prolonger d'environ cinq ans les bénéfices de la dopathérapie* », estime Stéphane Palfi. En parallèle, les chercheurs ont amélioré leur vecteur viral « *pour obtenir une sécrétion de dopamine plus soutenue dans les neurones cibles* ». Des essais ont été réalisés chez l'animal avec de meilleurs effets cliniques que le précédent vecteur et des analyses toxicologiques tout à fait rassurantes. « *Nous sommes en phase de préparation pour le lancement d'une étude biomédicale chez l'homme avec ce vecteur amélioré* », précise le chercheur.

Ces travaux ne s'arrêtent pas là. Cette thérapie génique n'est pas un traitement curatif, mais substitutif. « *L'essai réalisé avec notre vecteur viral a validé un concept,* souligne Stéphane Palfi. *Nous avons démontré que ce vecteur viral n'induit pas d'effets indésirables et que nous avons réussi à intégrer des gènes dans le génome de neurones. Nous pouvons donc envisager cette technologie pour d'autres approches plus curatives pour les maladies neurologiques telles que la réduction de la perte neuronale, en utilisant des molécules neuroprotectrices.* » ■

*L'UPDRS (Unified Parkinson's Disease Rating Scale) est l'échelle d'évaluation des symptômes de la maladie de Parkinson la plus couramment utilisée dans le monde.

*TU (Transducing Unit) correspond au nombre de particules virales dans une solution capables d'exprimer les gènes clés pour la synthèse de dopamine.

Pour en savoir plus

Livres

> Yves Agid, *L'Homme subconscient. Le cerveau et ses erreurs,* Robert Laffont, 2013.

> Marc Lévêque, *Psychochirurgie*, Springer, 2013.

> Jean-Didier Vincent, Pierre Marie Lledo, *Le Cerveau sur mesure,* Odile Jacob, 2012.

> Pierre Pollak, *La Maladie de Parkinson,* Odile Jacob, 2004.

Sur le Web

> **www.franceparkinson.fr**
Le site internet de l'association France Parkinson.

> **www.clinatec.fr**
Le site internet du laboratoire Clinatec.

> **www.neurostemcell.org**
Le site du consortium européen pour la thérapie cellulaire dans les maladies neurodégénératives.

La Recherche a publié

> E. Gillet, « Un pacemaker pour le cerveau », *La Recherche*, avril 2004, p. 42.

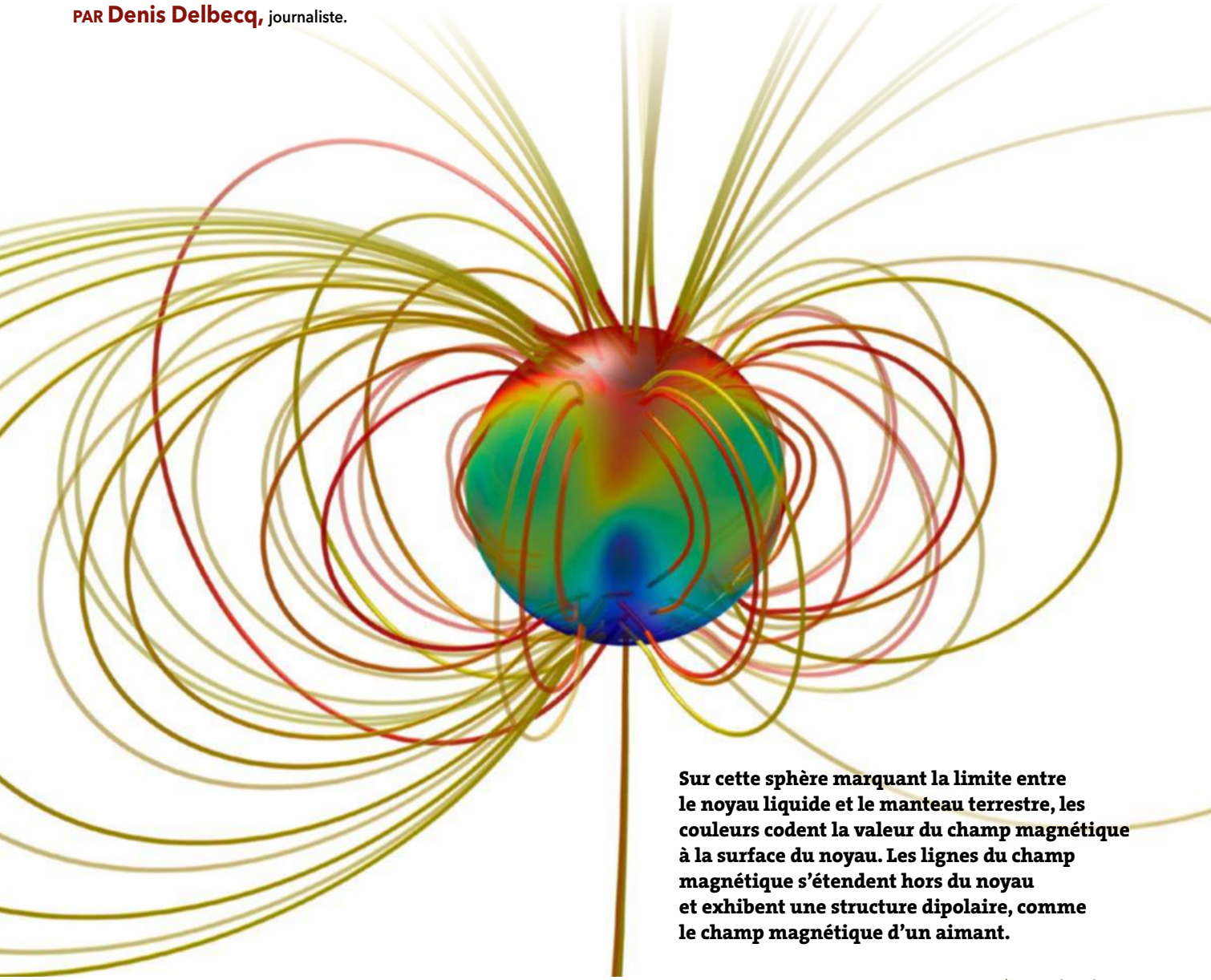
> E. Underwood, « Stimuler le cerveau pour stopper la dépression », *La Recherche,* avril 2014, p. 54.

Géophysique

Comment reproduire le champ magnétique terrestre ?

Bouclier de notre planète, le champ magnétique naît dans les entrailles de la Terre. Plusieurs expériences tentent de percer les mystères de cette dynamo terrestre.

PAR **Denis Delbecq,** journaliste.



Sur cette sphère marquant la limite entre le noyau liquide et le manteau terrestre, les couleurs codent la valeur du champ magnétique à la surface du noyau. Les lignes du champ magnétique s'étendent hors du noyau et exhibent une structure dipolaire, comme le champ magnétique d'un aimant.

Géophysique

Les magnifiques aurores boréales et australes nous le rappellent : notre planète est entourée d'un champ magnétique qui, malgré sa faible intensité, nous protège en déviant les dangereuses particules des vents solaires. Un champ qui prend naissance dans les entrailles de la Terre où la matière en fusion crée une véritable dynamo. Faute de pouvoir l'étudier de près, les géophysiciens construisent des modèles et élaborent des expériences de plus en plus complexes. « *Il y a un consensus scientifique sur l'existence d'une dynamo dans la partie liquide du noyau terrestre* », explique Henri-Claude Nataf, de l'équipe Geodynamo de l'Institut des sciences de la Terre de Grenoble. Des mouvements de matière conductrice produisent un courant électrique, lequel engendre un champ magnétique qui amplifie les courants jusqu'à créer le champ que l'on observe à la surface de la Terre. « *Nous pensons que le moteur de cette dynamo est la convection dans le noyau externe.* »

Au cœur de la Terre, le noyau est formé d'une graine solide métallique d'environ 2 240 kilomètres de diamètre, entourée du noyau externe, une couche de matière liquide, principalement du fer, épaisse de 2 260 kilomètres. Entre le bord de la graine – qui affiche 5 200 °C – et le bord inférieur du manteau – 3 800 °C –, l'écart de température dans le noyau liquide met en mouvement la matière liquide par convection, comme les volutes qu'on observe dans une casserole d'eau en train de chauffer. Il existe aussi un mécanisme de convection chimique dans le noyau liquide. Car lorsque le fer se solidifie au voisinage de la graine, le liquide résiduel s'enrichit en éléments légers et remonte. C'est l'ensemble de ces mouvements de matière qui induit le champ magnétique terrestre.

PHOTOTHÈQUE DU CNRS

L'expérience DTS est constituée de deux sphères concentriques (ici la plus grande en acier) entre lesquelles 40 litres de sodium liquide mis en mouvement jouent le rôle du noyau externe, liquide, de la Terre.

Cartographies par satellite. Le consensus sur le moteur de la dynamo terrestre est pourtant régulièrement réexaminé, à la lumière des observations indirectes. « *Des calculs et des expériences récents ont montré que la conductivité thermique du fer est deux à trois fois plus importante que ce que l'on pensait.* » Donc si le transfert de chaleur par conduction – par contact direct – est plus important, c'est que la convection serait moins intense que prévu. « *Cela nous conduit à imaginer d'autres scénarios. Par exemple, la convection prédominerait près de la graine, et la conduction dans la partie supérieure du noyau externe,* indique Henri-Claude Nataf. *D'autres moteurs pour la dynamo sont aussi envisagés, comme les mouvements produits par les marées ou par la précession de la Terre – le lent mouvement de rotation de l'axe de la Terre sur son orbite par rapport aux étoiles. Nous nous posons des questions, mais il n'y a pas pour le moment de remise en cause du consensus sur la convection thermo-chimique.* »

De fait, les géophysiciens ne savent pas encore expliquer l'intensité et les variations du champ magnétique terrestre que l'on constate à la surface de la Terre. Depuis la fin du XX^{e} siècle, des satellites ont été lancés pour cartographier le champ magnétique terrestre à partir d'une orbite basse : il y a d'abord eu Ørsted, au Danemark, en 1999, toujours

opérationnel, puis Champ, en Allemagne, de 2000 à 2010. Leurs observations sont complétées depuis fin 2013 par la constellation Swarm, trois satellites lancés par l'Agence spatiale européenne. « *On attend beaucoup de cette mission encore en cours, qui va nous permettre de détecter des ondes "magnéto-Coriolis" dans le noyau* », souligne Henri-Claude Nataf. On les nomme ainsi car elles sont induites par une double force : la force magnétique de Laplace et la force de Coriolis, liée à la rotation de la Terre.

« *Grâce aux données des observatoires magnétiques, on a déjà découvert l'existence d'ondes de torsion, une sous-famille de ces ondes. Elles prennent la forme de cylindres emboîtés autour de l'axe de rotation de la Terre et traversent le noyau liquide en quelques années. On a pu en déduire l'intensité du champ magnétique dans le noyau, qui serait de l'ordre de 2 à 3 millièmes de tesla – l'unité de champ magnétique –, et donc bien supérieure au 0,05 millième de tesla observé en moyenne à la surface du globe* [1]. »
Il semble donc qu'un véritable duel se joue dans les entrailles de la Terre, entre la force magnétique et celle de Coriolis. « *Il existe aussi un grand tourbillon autour de la graine, comme un anticyclone excentré qui lèche le manteau de manière plus marquée sous l'Atlantique que sous le Pacifique.* »

Si ces idées semblent admises dans la communauté scientifique, les modèles informatiques de la dynamo terrestre en donnent une vision grossière, mais non dénuée d'intérêt. À partir des années 1970, des modèles simplifiés ont montré l'apparition d'un effet dynamo engendré par les mouvements d'un fluide dans des configurations géométriques très simples. « *On doit la première simulation à grande échelle, en trois dimensions et dans une géométrie rappelant celle de la Terre, aux Américains Gary Glatzmaier et Paul Roberts en 1995* », raconte Stéphan Fauve, de l'École normale supérieure de Paris. Bien que reposant sur un modèle très simplifié, cette expérience numérique a permis d'observer des renversements du champ magnétique tels qu'il s'en produit régulièrement pour la Terre. « *Mais on ne peut pas réaliser de simulation directe des équations de la physique des fluides sans établir un modèle simplifié* », souligne le physicien. Car les phénomènes en jeu dans le noyau terrestre nécessitent de décrire la géométrie de l'écoulement dans le noyau à une échelle très fine, incompatible avec la puissance des ordinateurs. Aujourd'hui, ceux-ci peuvent simuler un noyau divisé en presque un milliard de petits volumes qui interagissent entre eux. « *Il en faudrait un milliard de fois plus, tout en multipliant par mille le nombre d'étapes de calcul,* explique Henri-Claude Nataf. *Autrement dit, il faudrait des machines mille milliards de fois plus puissantes !* »

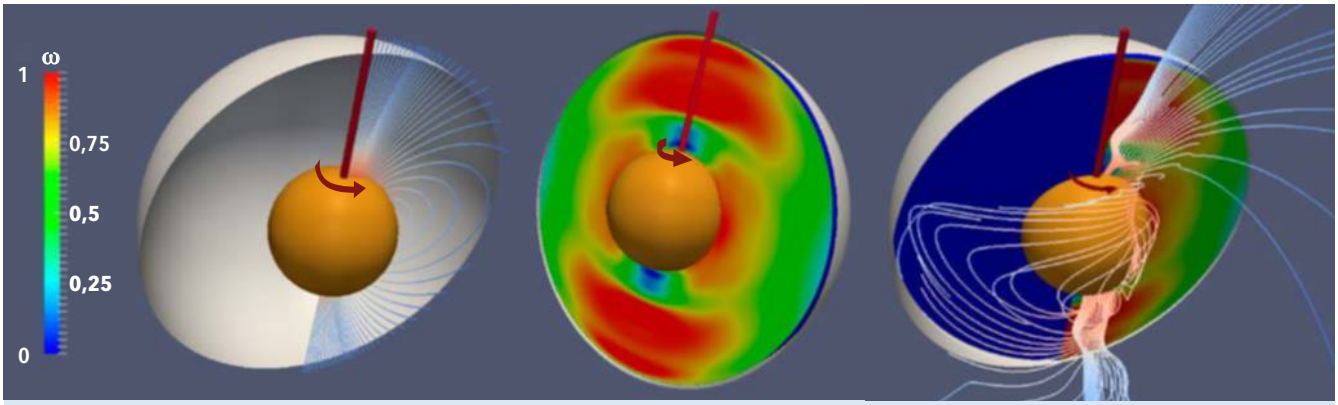
L'essentiel

> LE CHAMP MAGNÉTIQUE de la Terre est produit par un effet dynamo.

> DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES très simplifiées sont parvenues à reproduire certaines caractéristiques de ce champ, mais leur puissance reste insuffisante.

> APRÈS UNE DIZAINE D'ANNÉES, les expériences utilisant du métal liquide, comme le sodium, commencent à dévoiler les mécanismes à l'œuvre.

Modèles réduits. Faute de disposer de simulations fiables, les physiciens ont donc recours à l'expérience, en construisant des modèles réduits pour étudier l'effet dynamo. « *Fin 1999, deux expériences réalisées à Riga, en Lettonie, et à Karlsruhe, en Allemagne, avec des géométries d'écoulement très simples, ont permis d'observer la formation d'un champ magnétique par effet dynamo avec du sodium liquide* », raconte Henri-Claude Nataf. Une validation du principe de la dynamo, mais avec un écoulement fabriqué et une géométrie sans réel rapport avec ce qui se produit dans le noyau terrestre. « *De plus, dans ce type d'expérience, la force de Coriolis ne joue aucun rôle et le champ magnétique ne modifie pas l'écoulement, ce qui est très différent de ce qui se passe dans notre planète.* » ›››



© HENRI-CLAUDE NATAF/CNRS

Dans l'expérience DTS, un champ magnétique dipolaire (à gauche) est dû à un aimant permanent. Quand on lance la rotation de la sphère interne à la vitesse ω = 1, le sodium liquide se met à tourner également (au milieu). Les lignes de champ magnétique sont alors déformées par le flot du sodium (à droite).

Comment reproduire le champ magnétique terrestre ?

››› Depuis, plusieurs groupes tentent de réaliser des modèles réduits plus proches des conditions naturelles. « *Ce que montrent essentiellement ces expériences pour l'heure, c'est qu'il est beaucoup plus difficile d'obtenir l'effet dynamo dans un écoulement très turbulent* », note Henri-Claude Nataf.

Au CEA de Cadarache, l'expérience VKS menée depuis 1999 utilise aussi du sodium liquide, le matériau de référence pour l'étude de la dynamo terrestre. « *C'est le métal liquide qui offre la meilleure conductivité électrique* », justifie Stéphan Fauve, l'un des artisans de VKS. Un matériau qui a le bon goût de se liquéfier à 100 °C et qui est de faible densité, ce qui permet à la fois de le confiner facilement avec une paroi en acier, et de limiter la quantité d'énergie nécessaire aux expériences.

L'expérience VKS – baptisée ainsi car elle permet d'obtenir un écoulement dit de von Karman avec du sodium – consiste à provoquer le mouvement du métal liquide dans un cylindre de 60 centimètres de diamètre et (environ) autant de long, en faisant tourner des disques munis de pales en sens opposé autour de l'axe du cylindre, avec des vitesses réglables. Le cylindre emprisonne 150 litres de sodium liquide. « *Les moteurs d'entraînement des deux turbines sont plus gros que l'expérience elle-même,* souligne Stéphan Fauve. *Dans la première version, plus compacte, nous travaillions avec 50 litres de sodium et aucun système de refroidissement, ce qui limitait la durée des expériences à trente secondes.* »

En 2005, l'expérience a été profondément améliorée et rebaptisée VKS2. « *Aujourd'hui, nous pouvons travailler en continu, malgré la dissipation des 300 kilowatts de puissance des moteurs.* »

Fréquence de renversement. En 2006, VKS2 a permis, pour la première fois, d'observer l'apparition d'un effet dynamo dans un métal liquide, dans des conditions mimant – de loin – ce qui semble se passer dans le noyau terrestre [2]. Le mouvement du métal provient de la rotation en sens inverse des turbines qui sont en fer, un matériau ferromagnétique. Ce choix de matériau favorise l'apparition d'un champ magnétique dans l'expérience, mais l'éloigne des conditions qui règnent au cœur de la Terre, où le fer a perdu ses propriétés ferromagnétiques car il est chauffé au-delà de sa température de Curie*.

L'expérience VKS2 a également montré que le champ magnétique induit par effet dynamo dans un métal liquide peut se renverser, comme cela se produit pour le champ magnétique terrestre, qui a basculé environ 300 fois au cours des 200 derniers millions d'années, la dernière fois il y a 780 000 ans. Dans l'expérience de Cadarache, suivant les paramètres de fonctionnement, le renversement peut être erratique, périodique – comme cela se passe tous les onze ans pour le champ magnétique du Soleil – ou absent. Le renversement apparaît, dans VKS2, quand les deux turbines tournent à des vitesses différentes, c'est-à-dire quand on brise une symétrie [3]. « *Pour la Terre, la fréquence de renversement n'a pas été constante au cours des âges géologiques* », rappelle Stéphan Fauve.

Et s'il n'y a pas de couplage avéré entre la convection du manteau – moteur de la tectonique – et celle qui se produit dans le noyau, il existe néanmoins une corrélation : une fréquence de renversement du champ terrestre élevée correspond à une répartition asymétrique des continents par rapport au plan de l'équateur. « *Cela ressemble à ce qu'on observe avec VKS2, puisqu'il faut briser une symétrie dans l'expérience pour voir des renversements. Cela montre qu'avec ces expériences qui semblent très loin de la réalité, nous pouvons découvrir des choses sur les mécanismes de dynamo planétaire.* »

Et dans ce qu'observe le groupe VKS, il y a ce qui pourrait être une bien mauvaise nouvelle pour les astrophysiciens : un faible changement des conditions d'écoulement engendre des champs magnétiques très différents. « *Les expériences semblent montrer qu'on ne pourra pas tirer beaucoup d'informations sur la structure interne des planètes en étudiant la géométrie de leur champ magnétique* », prévient Stéphan Fauve.

En France, une seconde expérience à base de sodium liquide a été installée à Grenoble, sous l'égide de l'Institut

De la dynamo aux réacteurs nucléaires

En Allemagne, le centre Helmholtz de Dresde-Rossendorf a entrepris la construction du Dresdyn, un lourd appareillage d'étude du sodium liquide. Un réservoir cylindrique de 2 mètres de diamètre peut tourner autour de son axe, dont l'inclinaison est réglable de 45° à 90°, tandis que la table qui porte l'ensemble tourne dans un plan horizontal. De cette manière, le fluide subit une double rotation – suivant l'axe du cylindre jusqu'à 10 tours par seconde et suivant l'axe vertical de la table jusqu'à un tour par seconde. Cette double rotation reproduit la double rotation de la Terre sur son axe et la lente précession de cet axe par rapport aux étoiles. Conçu pour produire un effet dynamo dans le sodium, ce dispositif expérimental de 20 tonnes sera aussi mobilisé pour de nombreuses autres expériences, notamment pour mieux caractériser le sodium en tant que fluide caloporteur pour des réacteurs nucléaires à neutrons rapides – comme les anciens Phénix et Superphénix français – et pour étudier le fonctionnement et les risques associés aux batteries à métal liquide. Les premières expériences sont attendues d'ici trois ans.

* **LA TEMPÉRATURE DE CURIE** est la température à partir de laquelle un matériau perd son aimantation spontanée. Pour le fer, elle est voisine de 1 000 °C.

des sciences de la Terre. Il s'agit de DTS (pour Derviche Tourneur Sodium), pilotée par Henri-Claude Nataf, qui fonctionne depuis 2005. « *Nous avons choisi une géométrie très différente de celle de VKS* », explique le chercheur. En effet, DTS adopte une géométrie sphérique voisine de celle de la Terre : une sphère en inox de 42 centimètres de diamètre intérieur contient une sphère centrale de cuivre de 15 centimètres de diamètre. Les deux sphères peuvent tourner autour d'un même axe à des vitesses différentes, et l'espace entre les deux est rempli de 45 litres de sodium.

Cette maquette se rapprocherait du noyau terrestre s'il n'y avait une astuce pour forcer l'apparition d'un champ magnétique : la sphère centrale intègre un puissant aimant, qui produit un champ près de cent fois plus intense que celui qui règne dans les entrailles de la Terre. « *Nous ne cherchons pas à montrer un effet dynamo ou à reproduire le noyau terrestre. Nous souhaitons comprendre la turbulence de l'écoulement de sodium liquide, et voir comment il réagit à des forces de Coriolis (rotation) et de Laplace (magnétique) qui sont comparables, par exemple pour vérifier que le mouvement du fluide amplifie le champ magnétique imposé au départ.* » Là encore, l'écoulement est imposé par un système mécanique. « *Pour produire de la convection thermique dans le sodium liquide, il faudrait multiplier par cent la puissance injectée* », souligne Henri-Claude Nataf.

Suivant les conditions d'écoulement, l'expérience DTS provoque deux régimes dans le sodium liquide : une première situation dominée par la rotation, qui ressemble à ce qu'on obtiendrait avec de l'eau. Et une seconde, dominée par le magnétisme, qui produit un écoulement très différent. « *Nous avons obtenu un résultat un peu inattendu : là où le champ magnétique est fort, la turbulence réduit la diffusivité magnétique* », se réjouit Henri-Claude Nataf. Et si le champ magnétique diffuse moins, c'est que l'énergie magnétique reste piégée localement, ce qui permet d'amplifier le champ et l'effet dynamo. « *Cela montre que, dans une dynamo planétaire, le champ magnétique qui se crée localement peut être amplifié par la turbulence, ce qui semble être le cas au cœur de la Terre* [4]. » Ainsi, si une turbulence forte rend plus difficile la création de l'effet dynamo, la turbulence renforce cette dynamo quand elle existe.

DANIEL SERRANO/UNIVERSITÉ DU MARYLAND

Une expérience dynamo de grande ampleur est en cours à l'université du Maryland à College Park : une sphère de 3 mètres de diamètre (au centre) contient 12 000 litres de sodium liquide et une graine interne.

Expérience gigantesque. En juillet, de nouvelles expériences de DTS étaient en cours. « *Nous souhaitons confirmer nos observations sur la diffusivité magnétique, et nous espérons encore des surprises. Il nous faudra des mois pour traiter les données recueillies.* » Ensuite, comme VKS2, l'expérience DTS sera achevée. « *La suite logique est de renforcer notre collaboration avec Dan Lathrop, de l'université du Maryland, pour tenter d'obtenir un effet dynamo sur son installation* », indique Henri-Claude Nataf, qui a contribué à cette expérience spectaculaire depuis ses débuts.

À College Park, Daniel Lathrop a en effet conçu une expérience gigantesque : une sphère de 3 mètres de diamètre contient 12 000 litres de sodium liquide, emprisonnés entre la paroi d'inox et une sphère centrale de 1 mètre de diamètre. Coquille et « graine » peuvent tourner de manière indépendante autour d'un axe vertical. « *Cette expérience s'appuie sur une géométrie analogue à la nôtre,* explique Henri-Claude Nataf. *Mais contrairement à DTS, Dan Lathrop n'ajoute pas de champ magnétique ; il espère bien produire une vraie dynamo dans son écoulement de sodium.* » Pour le moment, l'expérience n'a pas engendré de champ magnétique. « *Le problème est que la sphère interne est lisse, au lieu de porter un relief qui favorise l'écoulement.* » Dan Lathrop espérait atteindre des vitesses de 40 mètres par seconde dans le sodium, or il obtient pour le moment dix fois moins. Quand il ajoute un petit champ magnétique pour « amorcer » une dynamo, il obtient des bouffées de champ qui retombent rapidement.

« *Une des pistes pour améliorer l'expérience serait de remplacer la sphère intérieure par une autre, rugueuse ou ornée de petites pales. Mais c'est une opération très laborieuse qui prendrait sans doute six mois.* » Pas simple en effet de manipuler de telles quantités de sodium, un métal qui réagit très fortement au contact d'eau liquide ou de vapeur… Mais ces expériences difficiles resteront les seules voies d'exploration envisageables avant que l'augmentation de puissance plus que notable des ordinateurs ne permette de simuler cette dynamo terrestre, si mystérieuse mais si utile. ■

[1] http://tinyurl.com/n8ldgen
[2] R. Monchaux *et al., Phys. Rev. Lett., 98,* 044502, 2007.
[3] B. Gallet *et al., Phys. Rev. Lett., 108,* 144501, 2012.
[4] S. Cabanes *et al., Phys. Rev. Lett., 113,* 184501, 2014.

Pour en savoir plus

> F. Pétrélis, J.-P. Valet et J. Besse, « When North heads South », *Physics World*, mars 2012, p. 51.

> H.-C. Nataf, « Unravelling the mystery of the Earth's magnetic field », *Europhysics News*, juillet-août 2014, 45/4, p.16.

Réchauffement climatique : peut-on sauver nos forêts ?

SPÉCIAL COP21

Ces prochaines années, les forêts européennes vont devoir faire face à un changement climatique à la fois très rapide et violent. Leurs chances de survie passent par la migration ou l'acclimatation.

PAR **Ivan Scotti,**
directeur de recherche à l'INRA, unité de recherche Écologie des forêts méditerranéennes (URFM), Avignon.

L'histoire des forêts européennes est marquée par une succession de bouleversements. Le dernier en date, le changement climatique actuel, très intense et très rapide et qui va en s'accélérant, leur prépare un avenir incertain.

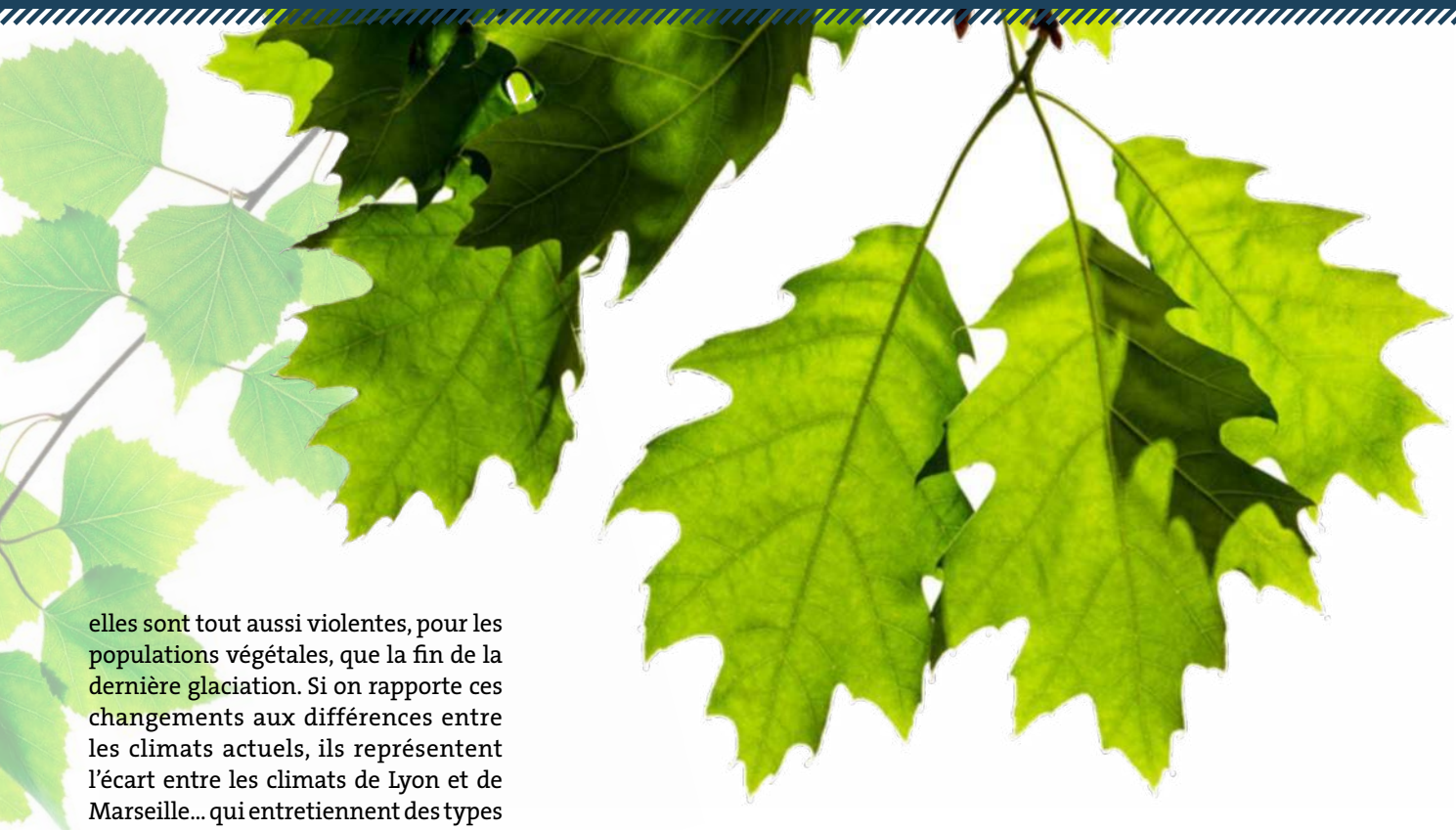
L'Europe n'a pas toujours été une terre forestière. Pendant la dernière époque glaciaire, c'est un endroit très peu favorable à l'existence des forêts, présentant un mélange de toundra et de steppe froide et aride, bordée par les glaciers de Scandinavie. Les forêts sont cantonnées dans les péninsules ibérique, italique et balkanique, et probablement dans quelques petites zones isolées plus au nord. La fin de la glaciation marque un changement considérable : en quelques millénaires, le climat se réchauffe au point que les forêts se répandent jusqu'au cercle polaire. Les données palynologiques (issues de l'étude des pollens et spores fossiles), montrent que les forêts ont progressé vers le nord et l'ouest du continent à l'impressionnante vitesse d'un kilomètre par an en moyenne. En comparaison, l'expansion naturelle des forêts sur les friches agricoles telle que l'on peut l'observer aujourd'hui n'est que de quelques dizaines de mètres par an.

Il y a huit mille ans, soit seulement deux mille ans après la fin de la glaciation, l'Europe est déjà uniformément recouverte de forêts de chênes, de charmes, de hêtres, de sapins, de pins... que l'homme défriche progressivement tout au long des millénaires suivants, pour faire la place à l'agriculture et à l'élevage et pour approvisionner l'industrie en matières premières. La situation subit un retournement à partir de la fin du XIXe siècle : partout en Europe, on assiste à un ralentissement sensible du déboisement, compensé d'une part par l'abandon des terres agricoles et des pâturages, qui se reboisent naturellement, et d'autre part par des campagnes extensives de reboisement (en France à partir du Second Empire). Vers la fin du XXe siècle, cette tendance débouche sur la « transition forestière » : on passe d'une phase de réduction de la surface forestière à une phase d'expansion.

On le voit, l'intervention de l'homme a eu un tel impact qu'aujourd'hui on ne peut pas vraiment parler de « forêt naturelle » en Europe (hors Russie), sauf pour quelques fragments (dont le plus grand, d'à peine 3 000 kilomètres carrés, est la forêt de Białowieża, entre la Pologne et la Biélorussie) et pour certaines forêts inaccessibles de montagne. La forêt européenne est pour l'essentiel un espace semi-naturel. Comment le changement climatique à l'œuvre aujourd'hui va-t-il la modeler ?

En 2050, 2 °C de plus. Le cinquième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) prédit que, dans cinquante ou cent ans, en Europe occidentale, les températures seront plus élevées et les précipitations moindres. Selon une estimation moyenne, les températures en France pourraient augmenter de 2 °C d'ici à 2050, et les précipitations diminuer de 10 à 20 %. Ces variations peuvent sembler peu importantes, mais

BORIS RYAPOSOV/SHUTTERSTOCK



STEVE GERIG/FOTOLIA

elles sont tout aussi violentes, pour les populations végétales, que la fin de la dernière glaciation. Si on rapporte ces changements aux différences entre les climats actuels, ils représentent l'écart entre les climats de Lyon et de Marseille… qui entretiennent des types de végétation bien différents !

Les chercheurs ont identifié une « enveloppe climatique » idéale pour la croissance et la reproduction de chaque espèce. Il s'agit du territoire dans lequel le climat est favorable à la vie d'une espèce. Sur la base des projections de changement climatique, il est donc possible de prédire le « déplacement » futur des enveloppes climatiques. Ainsi, dans le scénario moyen pour 2080, le chêne vert, une espèce typiquement méditerranéenne, rencontrerait un climat optimal jusqu'à Paris, tandis que le hêtre, très répandu dans les forêts d'Europe centrale, disparaîtrait peu à peu pour se retirer dans les plus hautes montagnes.

Toutefois, ces prévisions concernant le déplacement des optimums climatiques reposent sur des changements moyens de température ; il faut ajouter à cela l'effet des phénomènes extrêmes et des interactions avec d'autres organismes. On prévoit des tempêtes, des sécheresses, des feux de forêt et des inondations plus fréquents et plus intenses. Ces phénomènes vont augmenter la mortalité des arbres, en les privant de ressources (l'eau, en cas de sécheresse ; l'oxygène au niveau des racines, en cas d'engorgement du sol) ou en les tuant directement (feux, tempêtes). Ces changements déclenchent d'autres conséquences en cascade, notamment en ce qui concerne les interactions biotiques, qui désignent toute relation impliquant des organismes d'espèces différentes. L'effet combiné de la réduction des précipitations et de l'augmentation des températures pourrait causer des altérations dans la composition de la flore microbienne du sol (champignons, bactéries). Or c'est elle qui est responsable de la mise à disposition des nutriments pour les arbres par le biais des symbioses (comme les mycorhizes*).

Autrement dit, les événements extrêmes pourraient causer une diminution de la fertilité des sols. Certains ravageurs des arbres pourront également se répandre à la faveur du changement climatique, car ils rencontreront des conditions favorables à des latitudes qui, jusqu'alors, ne leur permettaient pas de se développer. On constate dès aujourd'hui une rapide progression vers le nord de certains ennemis jurés des forêts. Ainsi, la chenille processionnaire du pin (qui se nourrit des aiguilles des résineux) devance le déplacement des arbres [1]. D'autres ravageurs montent déjà en puissance dans les forêts d'Europe : le mildiou, qui affecte beaucoup d'espèces dont les chênes, est une maladie provoquée par des champignons – notamment les Phytophthora – entraînant le pourrissement et la mort des feuilles, son développement étant favorisé par l'augmentation des températures moyennes ; les scolytes, coléoptères ravageurs de l'écorce des conifères, qui peuvent désormais réaliser plusieurs cycles de reproduction par an et croître ainsi en nombre et en impact. Une plus faible fertilité des sols et une recrudescence des attaques de ravageurs affaiblissent les arbres, les rendant ainsi plus sensibles aux sécheresses et aux feux, ›››

*LA MYCORHIZE désigne l'association du mycélium, partie végétative du champignon composée de fins filaments, et des racines de l'arbre.

L'essentiel

› LES FORÊTS vont faire face dans les prochaines décennies à des bouleversements d'une rapidité encore jamais atteinte.

› LES CHERCHEURS développent actuellement des techniques pour en atténuer les conséquences.

› DEUX SOLUTIONS sont envisagées : la migration assistée et l'adaptation, soit par l'acclimatation naturelle, soit par l'amélioration génétique.

Réchauffement climatique : peut-on sauver nos forêts ?

›››› qui à leur tour affaiblissent encore leurs défenses… Cela montre bien que le changement climatique n'est pas juste une question de hausse des températures, et que ses effets peuvent être grandement amplifiés par des boucles de rétroaction et par des réactions en cascade. Comme beaucoup d'organismes à cycle de vie long, un arbre a des réserves qui lui permettent de faire face aux adversités, mais leur niveau baisse avec chaque attaque. Si une forêt n'a pas le temps de régénérer ses réserves entre deux passages difficiles, elle finit par dépérir et éventuellement disparaître.

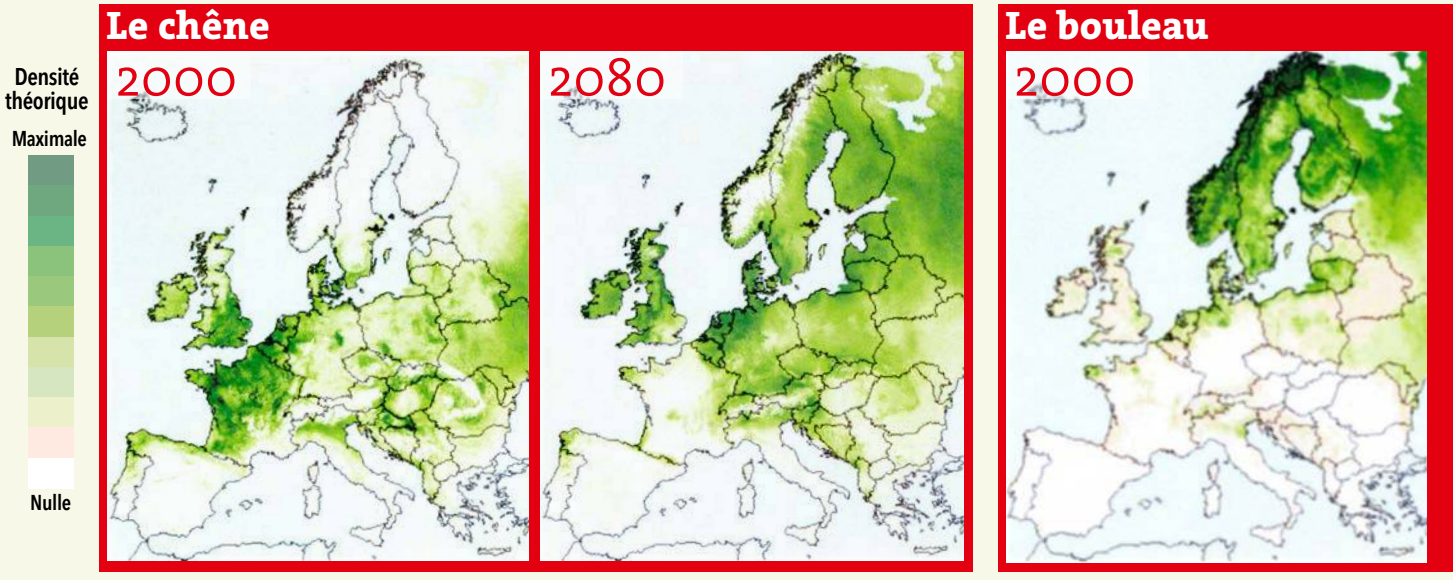
Toutefois, nous avons vu que les espèces forestières ont su « réagir » à l'augmentation des températures de la fin de la dernière glaciation en se déplaçant vers le nord : elles dépérissaient au sud, mais elles colonisaient des régions plus septentrionales. Alors pourquoi ne se déplaceraient-elles pas à nouveau aujourd'hui ? Principalement pour des questions de vitesse : le changement courant est beaucoup trop rapide pour que les arbres puissent suivre leurs enveloppes climatiques. Tant que le changement climatique continuera, les arbres seront obligés de « rattraper » en permanence la distance qui les séparera des régions où le climat leur convient, qui glissent vers le nord. Il faudrait en effet que les espèces forestières migrent à une vitesse de 6 à 7 kilomètres par an, soit presque dix fois plus vite qu'à la fin de la dernière glaciation, ce qui est très probablement impossible.

Dépérissement massif. Le résultat attendu n'est donc pas un coulissement vers le nord de chaque type de forêts au même rythme que le coulissement du climat, mais plutôt un dépérissement massif et étendu de l'ensemble des forêts des climats plus frais (la plupart des espèces des climats plus chauds devraient en revanche tolérer une augmentation modérée des températures). Le dépérissement induit par le changement climatique est déjà visible pour un certain nombre d'espèces, tels le chêne et le hêtre, et devrait être suivi par une lente et progressive colonisation de la part des espèces méridionales, tout particulièrement le chêne vert, et, dans une moindre mesure, les pins méditerranéens comme le pin d'Alep.

Les forêts pourraient cependant faire face au changement climatique en s'adaptant aux nouvelles conditions, de deux façons différentes. Un premier mécanisme possible est l'acclimatation, par laquelle les arbres, individuellement, ajusteraient leur métabolisme aux plus fortes températures et aux plus faibles précipitations. Le second mécanisme est la sélection naturelle, qui éliminerait les individus moins adaptés aux nouveaux climats et permettrait la survie et la reproduction de ceux qui ont des caractéristiques plus favorables.

Si ces deux modes d'adaptation existent bien chez les organismes vivants, et chez les arbres en particulier, et si la sélection naturelle façonne sans discontinuer les populations, la vitesse du changement rend, là aussi, le résultat incertain. Il ne faut pas oublier que l'extinction est l'une des issues possibles du processus de sélection : quand le changement des conditions environnementales est trop rapide, ou l'intensité de la sélection trop importante, le processus peut aboutir à l'élimination de toute une population ou d'une espèce.

JOPELKA/SHUTTERSTOCK



Ces cartes montrent que, d'ici à 2080, le chêne et le bouleau auront déserté la France pour, dans le meilleur des cas, s'implanter en Scandinavie, où le climat leur sera plus favorable. L'acacia, présent sur les rives de la Méditerranée,

Que sait-on du potentiel de chacun de ces mécanismes ? Peut-on « aider » les forêts à faire face au changement climatique ? En ce qui concerne le potentiel de migration (lire « Les arbres migrent-ils ? », ci-contre), si la majorité des graines est disséminée à des distances de l'ordre de quelques dizaines de mètres de l'arbre parent, il y a des rares épisodes de dispersion à très longue distance, parfois sur plusieurs kilomètres, provoqués par des épisodes particuliers. Par exemple, les crues et les tempêtes emportent les graines, les animaux qui les ont ingérées migrent ou les transportent accrochées à la fourrure, aux serres, etc. Ces rares cas pourraient contribuer à l'établissement de petits groupes « avancés » de quelques individus, loin de leur peuplement d'origine, qui aideraient à entamer le processus de colonisation des nouveaux espaces.

Ces exemples inspirent une première stratégie de gestion des forêts face au changement climatique : la « migration assistée », qui consiste à faciliter le déplacement des espèces méridionales vers le nord, afin de rendre plus efficace le remplacement des espèces actuelles par celles qui seront adaptées demain. Cela présuppose de planter les arbres hors de leur enveloppe climatique actuelle afin qu'ils soient déjà présents quand le climat qui leur est favorable arrivera jusqu'à eux. La migration assistée n'est pas encore pratiquée en Europe, mais il existe des essais au Canada : en Colombie-Britannique, on plante ainsi des essences forestières à des altitudes jusqu'à 100 mètres plus élevées par rapport à leurs altitudes de croissance naturelle et, au Québec, on en transplante à des centaines de kilomètres plus au nord.

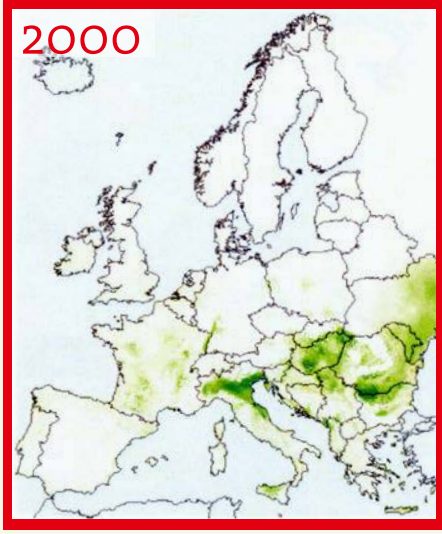
Sélection naturelle. Du point de vue du potentiel d'adaptation, les chercheurs suivent deux pistes principales : l'amélioration génétique et l'acclimatation. La première a pour but de favoriser la sélection naturelle, en accélérant la propagation des individus portant des gènes conférant une meilleure adaptation au climat du futur. Beaucoup d'études ont montré que la diversité génétique* des arbres est très forte, et qu'elle est à la base de l'adaptation ›››

*LA DIVERSITÉ GÉNÉTIQUE mesure, pour une espèce ou une population donnée, à la fois le nombre de variants différents d'un même gène présents dans une population et l'abondance de chacun de ses variants.

Les arbres migrent-ils ?

Il n'est pas habituel de penser en termes de « migration » de populations de plantes en général et d'arbres en particulier ; le terme « migration » renvoie généralement au déplacement de groupes d'individus d'un lieu à un autre, chose évidemment impossible pour des organismes ancrés au sol par leurs racines. Néanmoins, les populations d'arbres peuvent migrer en disséminant leurs graines, qui peuvent ainsi s'établir un peu plus loin (on parle alors de « front de colonisation »). Si les arbres parents vieillissent et meurent sans que de nouveaux arbres les remplacent, la forêt se sera globalement déplacée. Bien sûr, il est possible que la régénération de la forêt se produise à la fois dans les zones occupées précédemment et sur le front de colonisation ; dans ce cas, la forêt sera en expansion (comme dans le cas des forêts de la fin de la glaciation ou bien dans le cas des forêts qui envahissent les pelouses alpines). Dans les deux cas, on peut parler de « migration » de la forêt.

L'acacia



colonisera, lui, l'est de l'Europe. Toutefois, une question demeure : les espèces auront-elles le temps de coloniser de nouveaux territoires ? © EUROFOREST.EU

Réchauffement climatique : peut-on sauver nos forêts ?

››› des arbres à leur environnement par sélection naturelle [2]. On sait que, dans les climats tempérés, les arbres sont adaptés aux gradients climatiques* à grande échelle. Ainsi, dans l'hémisphère nord, des peuplements d'arbres adaptés aux climats plus froids commenceront à produire des feuilles plus tardivement, au printemps, que les peuplements plus méridionaux. Cela permet aux arbres d'exploiter au mieux la bonne saison tout en minimisant les risques associés aux gels tardifs. Des chercheurs suédois ont montré que, chez le peuplier, cela est dû à la sélection opérant sur les variants des gènes qui sont impliqués dans la perception de l'allongement de la durée du jour (la « photopériode ») : les variants les plus communs aux basses latitudes sont plus rares aux hautes latitudes, indiquant que la sélection naturelle a favorisé des individus ayant des caractéristiques génétiques différentes selon le climat.

De la même façon, des chercheurs nord-américains ont également prouvé que l'adaptation a façonné la diversité génétique des peuplements de plusieurs conifères vis-à-vis de la résistance à la sécheresse dans les Rocheuses ou à l'échelle continentale, et même à une échelle beaucoup plus locale dans le bassin-versant d'un lac. Les équipes de l'INRA ont trouvé des indications dans ce sens à une échelle encore plus locale, chez le hêtre sur les flancs du mont Ventoux (Vaucluse) ou chez des arbres tropicaux en Guyane française, même à l'échelle d'une seule colline.

Pour exploiter ce phénomène dans la préservation des forêts, il faut identifier les gènes responsables de ce type d'adaptation. Cela a été fait de façon détaillée pour les conifères d'Amérique du Nord et les peupliers en Europe cités plus haut. Un outil essentiel dans ce but est le séquençage du génome des arbres forestiers, dont le dernier en date est celui du chêne, tout récemment séquencé par un consortium international mené par l'INRA [3]. Ces informations permettent de passer de la description à la gestion des bases génétiques de l'adaptation : on pourra alors choisir les arbres à transplanter selon leur composition génétique et selon ce que l'on sait de la capacité d'adaptation fournie par chaque combinaison de variants génétiques. Pour certaines espèces à cycle vital plus court, par exemple le peuplier, on pourra utiliser des croisements (comme pour les plantes cultivées) afin d'améliorer de façon ciblée le potentiel d'adaptation.

Un modèle mathématique permet de prédire l'évolution des populations d'arbres

En ce qui concerne l'acclimatation, on cherchera à exploiter la plasticité des arbres – c'est-à-dire leur capacité à modifier leur physiologie en fonction des conditions du milieu – afin de prédire leur réaction au changement climatique, d'identifier les conditions dans lesquelles ils sauront le tolérer et d'adapter les pratiques sylvicoles aux contraintes qu'il impose.

Bien évidemment, ces trois stratégies – migration assistée, adaptation par sélection naturelle ou amélioration génétique, acclimatation – peuvent et doivent être intégrées dans une seule qui combine sélection, transplantation et sylviculture. Pour faciliter la mise en place de cette stratégie intégrée, mes collègues de l'INRA-URFM ont mis au point un modèle mathématique permettant de prédire le fonctionnement des populations d'arbres intégrant tous ces facteurs [4]. Ce modèle prend en compte les conditions environnementales, la physiologie de la plante, la composition génétique des peuplements et son effet sur la physiologie, ainsi que la façon dont les arbres sont pollinisés et dispersent leurs graines, pour en prédire l'évolution future. Il a été calibré pour l'instant sur le hêtre, mais son utilisation a vocation à être généralisée ; s'il ne se traduit pas encore en une application pratique, ce modèle constitue un outil très puissant, et son efficacité sera au fur et à mesure augmentée par l'acquisition d'informations sur les caractères adaptatifs et sur le génome.

Ces pistes de gestion et de sauvegarde des forêts d'Europe nous permettent d'entretenir un peu d'espoir concernant leur avenir. L'impact attendu du changement climatique sur les écosystèmes forestiers est d'une ampleur jusqu'ici inconnue : les fluctuations naturelles imposées par les cycles glaciaires ont été très fortes, mais elles n'ont pas été aussi rapides et violentes que les dérèglements en cours et qui nous attendent dans un futur proche. L'homme a modifié les forêts du continent sans discontinuer au long des derniers millénaires pour parvenir à ses fins. Ces écosystèmes sont une ressource, mais aussi un patrimoine culturel et un réservoir de biodiversité. Il est temps de tirer profit de notre maîtrise des forêts pour les préserver. ■

*UN GRADIENT, en écologie, indique une variation plus ou moins continue et graduelle d'une variable environnementale.

[1] J. Rousselet et A. Roques, « L'inexorable avancée de la chenille processionnaire », 2013. En ligne : http://tinyurl.com/nwql7hx
[2] O. Savolainen *et al., Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst., 38,* 595, 2007.
[3] C. Plomion *et al., Mol. Ecol. Resour.,* doi:10.1111/1755-0998.12425, 2015.
[4] S. Oddou-Muratorio et H. Davi, *Evol. Appl.,* 7, 453, 2014.

Pour en savoir plus

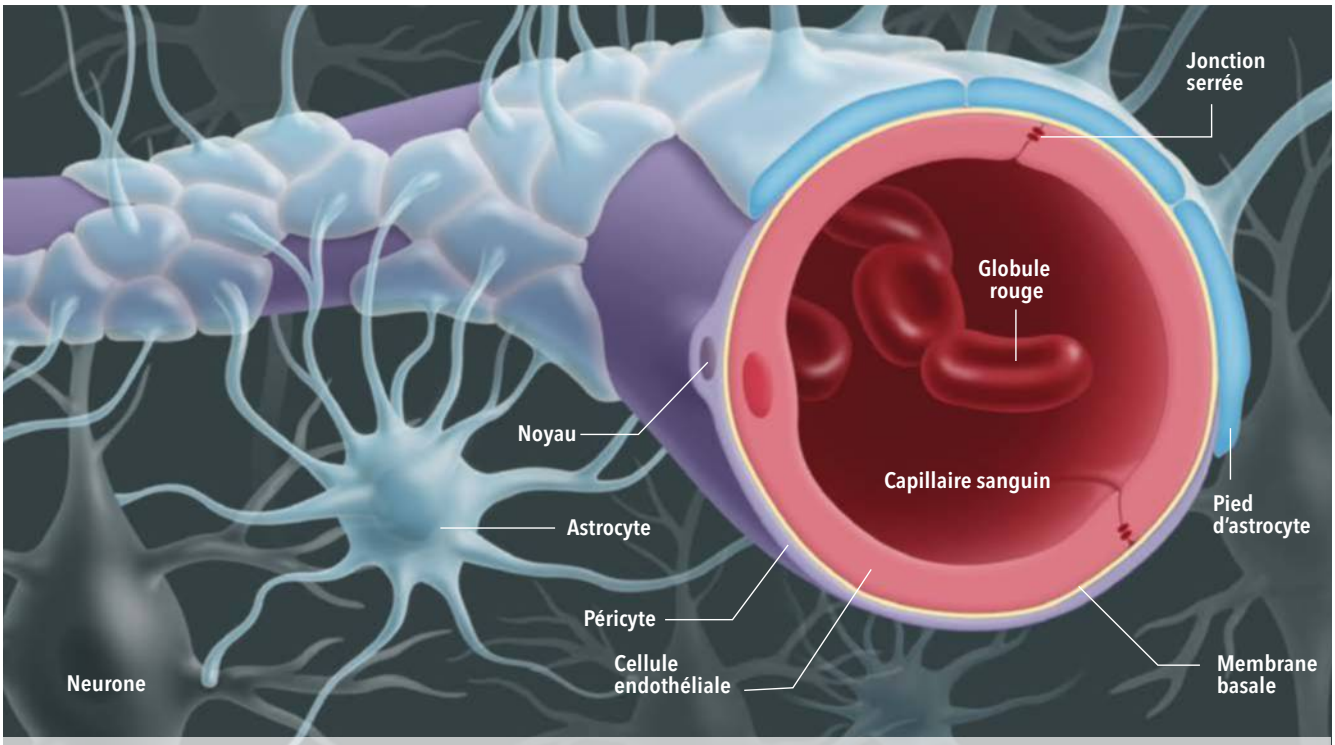
> **http://tinyurl.com/qdnpyas** Le cinquième rapport du GIEC (2013), consultable en ligne.

> **http://www.trees4future.eu/** Le site de Trees4Future, projet européen dont l'objectif est de concevoir les arbres du futur.

> **http://www.foresttrac.eu/** Le site de Foresttrac, projet de coordination transatlantique de la recherche en génomique des forêts.

Une brèche salvatrice dans le cerveau

Plusieurs techniques permettent désormais d'ouvrir un passage dans le système de protection du cerveau. Elles préfigurent une meilleure efficacité des traitements contre certaines maladies du système nerveux central.



INFOGRAPHIES : SYLVIE DESSERT

LA BARRIÈRE HÉMATO-ENCÉPHALIQUE protège le cerveau des agents pathogènes circulant dans le sang. Elle se compose de trois couches de cellules qui interagissent : les cellules endothéliales qui constituent la couche interne des capillaires sanguins, les péricytes qui enserrent la couche endothéliale, et les astrocytes qui recouvrent l'ensemble de leurs pieds. Ce maillage assure la protection du cerveau, mais complique le traitement des maladies neurologiques, car les molécules actives ne peuvent traverser ce filtre.

PAR **Anne Debroise,**
journaliste.

Inaccessible, le cerveau ? Plus pour longtemps... Fin 2014, plusieurs équipes entreprenaient les premiers essais cliniques visant à faire franchir à des anticancéreux la barrière hémato-encéphalique, un ensemble de tissus et de processus biochimiques qui empêche de nombreux traitements injectés dans le sang de parvenir au cerveau. La technique employée ? Des ultrasons [1].

La méthode a déjà largement fait ses preuves chez l'animal. Dès 2010 en effet, une équipe de l'Institut de recherche Sunnybrook de Toronto, au Canada, démontrait que les ultrasons ouvrent la barrière hémato-encéphalique chez des rongeurs. Et, début 2015, en appliquant la méthode à des souris modèles pour la maladie d'Alzheimer, une équipe de l'Institut du cerveau de l'université du Queensland, en Australie, a réussi ›››

Une brèche salvatrice dans le cerveau

››› à réduire de 75 % les dépôts de peptides bêta-amyloïdes caractéristiques de la maladie [2]. Si elle est la première à passer à l'étape des essais cliniques, la technique des ultrasons n'est pas la seule à promettre de faire pénétrer des médicaments dans le cerveau. Toute une panoplie de stratégies, très différentes, est à la veille d'être testée chez l'homme.

L'enjeu est d'importance. Aujourd'hui, en effet, plus de 95 % des molécules pharmacologiques n'ont aucun effet sur le cerveau. Et pour cause : injectées dans la circulation sanguine, elles ne pénètrent pas dans le système nerveux central. Elles se heurtent à la barrière hémato-encéphalique, qui en protège l'accès. Si cette barrière laisse passer quelques molécules endogènes utiles à son fonctionnement (eau, ions, glucose, acides aminés…), elle interdit quasiment tout le reste. Un tri essentiel : rien ne doit en effet perturber le fonctionnement des neurones, et encore moins les intoxiquer.

Parce qu'elle est efficace, la barrière hémato-encéphalique est devenue la bête noire des médecins spécialistes des maladies du système nerveux central. En empêchant le passage des molécules pharmacologiques, elle condamne la plupart de leurs stratégies thérapeutiques à l'échec. Elle est notamment responsable de la faible sensibilité des tumeurs cérébrales aux chimiothérapies, ou de l'inexistence de traitements pharmacologiques actifs contre les maladies neurodégénératives telles que la maladie d'Alzheimer ou de Parkinson (lire « Trois stratégies pour vaincre Parkinson », page 26). La situation se révèle d'autant plus frustrante que des molécules efficaces existent… *in vitro* ! Pour Danica Stanimirovic, qui dirige le « programme des thérapeutiques au-delà de la barrière hémato-encéphalique » au Conseil national de recherches du Canada, *« développer des médicaments pour le cerveau est particulièrement complexe, long et risqué. En outre, les échecs ont tendance à se produire plus tard au cours du développement clinique ; en conséquence, le coût de développement de ces médicaments est plus élevé que pour n'importe quelle autre indication »*.

De multiples remparts. Le cerveau est en effet une forteresse bien gardée. Protégé derrière la boîte crânienne et enveloppé dans ses méninges*, baignant dans le liquide céphalo-rachidien qui amortit d'éventuels chocs et évacue ses déchets vers le sang, il offre très peu de points d'entrée aux molécules venues de l'extérieur. Sauf à l'interface avec la circulation sanguine. *« La longueur du réseau de capillaires qui alimente le cerveau en nutriments et en énergie dépasse les 600 kilomètres,* décrit Xavier Declèves, responsable de l'équipe Physiopathologie et cibles thérapeutiques de la barrière hémato-encéphalique à l'université Paris-Descartes. *C'est un point d'entrée potentiel pour un grand nombre de molécules. »* Or, à ce niveau, on trouve la barrière hémato-encéphalique.

Les cellules endothéliales, qui constituent la paroi interne des vaisseaux sanguins, plus serrées dans les capillaires du cerveau que partout ailleurs, en constituent le premier rempart. Leur étanchéité est assurée par des molécules d'adhésion (qui forment une sorte de « colle » entre les cellules) et par des péricytes, cellules contractiles (capables de se contracter) en forme d'étoile dont les bras enserrent les capillaires. L'imperméabilité de l'ensemble est encore renforcée par les pieds des astrocytes (cellules responsables de l'approvisionnement énergétique des neurones) qui recouvrent 99 % de la surface des microvaisseaux cérébraux.

Passage en force par ultrasons. C'est à cet enchevêtrement de corps cellulaires et de tissus que s'attaquent les ultrasons. La technique a été développée dans les années 1980 par le physicien Kullervo Hynynen, de l'Institut Sunnybrook. Il a montré que les faisceaux d'ultrasons émis par une sonde posée sur le crâne peuvent être focalisés sur des zones cérébrales profondes. En injectant simultanément dans la circulation sanguine des microbulles de gaz soluble, ils provoquent leur expansion et leur contraction. La pression mécanique induite par ces mouvements répétés finit par ouvrir un passage entre les cellules endothéliales pendant environ six heures [fig.1]. Début 2015, l'équipe canadienne a commencé à recruter ses premiers patients dans le but de lancer des essais cliniques.

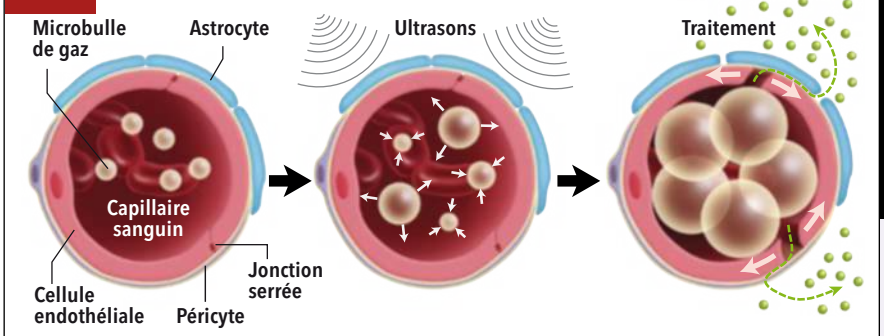
Des essais qu'une équipe française a déjà engagés en 2014. Alexandre Carpentier, neurochirurgien à l'hôpital de la Pitié-Salpêtrière, à Paris, utilise un dispositif émetteur d'ultrasons qu'il développe au sein de la start-up universitaire CarThera (dirigée par Frédéric Sottilini) qu'il a créée. Caractéristique du dispositif : il est conçu pour être implanté directement dans l'épaisseur de l'os crânien, après l'opération d'ablation de la tumeur. *« Cette technique nous fait gagner en précision, car elle s'affranchit de l'absorption et de la diffraction des ondes par l'épaisseur et l'irrégularité du crâne humain »*, souligne-t-il. Plusieurs patients atteints de glioblastome, une des formes de cancer du cerveau les plus sévères, ont d'ores et déjà été implantés.

L'essentiel

- **LA BARRIÈRE HÉMATO-ENCÉPHALIQUE** protège le cerveau des agents pathogènes.
- **ELLE EMPÊCHE** la majorité des médicaments d'accéder au cerveau.
- **PLUSIEURS ESSAIS CLINIQUES** sont engagés, utilisant notamment des ultrasons, pour tenter de franchir cette barrière.

*LES MÉNINGES sont les trois membranes qui enveloppent le système nerveux central.

Fig.1 Comment ouvrir la barrière hémato-encéphalique

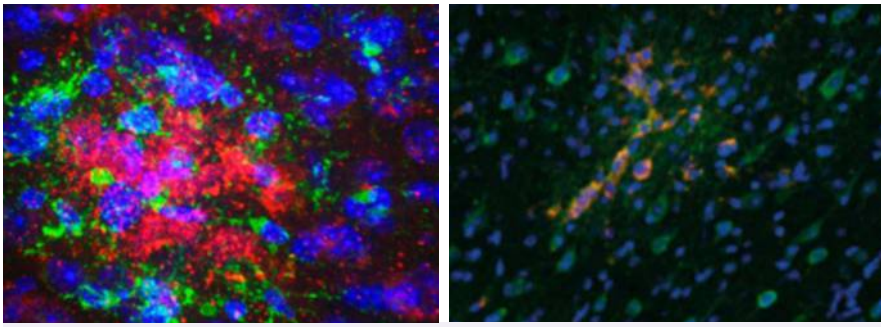


1 Des microbulles, injectées dans la circulation sanguine, arrivent dans les capillaires du cerveau.

2 Soumises à des ultrasons, ces bulles se dilatent et se rétractent de façon répétée.

3 Les bulles exercent une pression mécanique, desserrant les jonctions serrées et les péricytes. La barrière hémato-encéphalique s'ouvre, laissant pénétrer les traitements.

Après avoir injecté par voie sanguine un colorant chez un lapin, cette image IRM révèle qu'il est présent dans son cerveau (zones plus claires). Il a donc franchi la barrière hémato-encéphalique, ouverte après un traitement par ultrasons.



Dans le cerveau de souris non traitées (à gauche), les plaques responsables de la maladie d'Alzheimer (en rouge) sont entourées par des cellules immunitaires (en vert). Après des ouvertures répétées de la barrière hémato-encéphalique (à droite), les cellules immunitaires ont absorbé les plaques pour les détruire. BITPLANE AG

Une fois par mois, l'émetteur d'ultrasons est connecté à une alimentation électrique grâce à une aiguille très fine, des microbulles sont injectées dans la circulation générale avant la chimiothérapie. « *Nous avons déjà ouvert la barrière hémato-encéphalique plus de vingt fois* », annonce Alexandre Carpentier. Les premiers résultats devraient être publiés à la fin de l'année.

Ces essais cliniques doivent surtout convaincre de l'innocuité de la méthode. Si aucune inflammation ni effet secondaire n'ont été rapportés chez les animaux, elle suscite en effet des craintes : « *Le problème des ultrasons, c'est qu'ils ouvrent, dans la zone où ils sont appliqués, la barrière à tout type de molécule sans aucune distinction, y compris des globules rouges ou de l'albumine. En fonction de la taille de l'ouverture et de la technique d'ultrason utilisée, plusieurs constituants du sérum sanguin potentiellement toxiques peuvent pénétrer dans le cerveau* », s'inquiète ainsi Xavier Declèves.

D'autres méthodes que les ultrasons sont également proches d'aboutir. Pour être plus sélectifs, certains chercheurs tentent de faire passer les médicaments pour des molécules disposant naturellement d'un « droit de passage » à travers la barrière hémato-encéphalique. Le mode de passage le plus simple est la diffusion passive à travers la membrane cellulaire des cellules endothéliales. Seules les petites molécules lipophiles* parviennent à se faufiler entre les lipides constitutifs de leur membrane. C'est d'ailleurs ainsi que l'alcool accède aux neurones, avec l'effet que l'on sait. Si la molécule d'intérêt thérapeutique mesure moins d'un nanomètre, le travail des chimistes consiste à la rendre plus lipophile de manière à lui faciliter le passage. Mais cette stratégie présente deux inconvénients. Le premier, c'est qu'une fois dans la cellule, les intrus peuvent être reconduits dans le sang par des transporteurs spécialisés. Le second, c'est qu'une molécule lipophile va pénétrer dans tous les organes de l'organisme. Avant qu'une quantité utile parvienne au cerveau, il faudra donc en administrer des doses plus importantes, potentiellement toxiques.

Cibler les cellules tumorales. Cet écueil peut être contourné en ciblant des transporteurs spécifiques de la barrière hémato-encéphalique. Insérés dans la membrane des cellules endothéliales, ils disposent d'une extrémité ouvrant sur la circulation sanguine, où ils captent certaines molécules (comme le glucose), et d'une autre, côté neurones, où ils les éjectent. En modifiant les molécules à visée thérapeutique, les chimistes parviennent parfois à leur donner suffisamment d'affinité avec le transporteur pour qu'ils passent. La lévodopa, médicament utilisé pour lutter contre la maladie de Parkinson, est un de ceux-là.

Cette voie de passage reste cependant très restrictive. On ne peut notamment envisager de faire passer des molécules pharmaceutiques de taille >>>

*LA LIPOPHILIE est l'affinité d'une molécules pour les lipides.

PR. ALEXANDRE CARPENTIER

Une brèche salvatrice dans le cerveau

›››› importante, comme des protéines, des enzymes, des virus vecteurs de thérapie génique, etc. Pour celles-ci, les biochimistes tentent de passer par la voie utilisée par l'insuline notamment : la transcytose. L'insuline est d'abord captée par des récepteurs spécifiques situés à la surface de la membrane endothéliale. La membrane se déforme autour d'elle pour l'englober dans une vésicule, qui va traverser la cellule, fusionner avec la membrane de l'autre côté de la cellule, et éjecter l'insuline dans le cerveau.

La transcytose présente l'avantage de permettre le passage de particules de taille relativement importante, et de les protéger de toute dégradation pendant la traversée. Les chimistes l'exploitent pour faire passer des structures chimiques assez complexes, dotées de nombreuses fonctions. Le véhicule sur lequel elles sont le plus souvent greffées aujourd'hui se compose de nanoparticules à base de lipides (liposomes), de polymères (dendrimères), de carbone ou même de métaux. En plus de l'élément qui déclenchera le mécanisme de transcytose, elles peuvent être dotées de plusieurs « options » qui donneront par exemple à ce véhicule la capacité de cibler exactement l'organe à soigner, évitant ainsi de nombreux effets secondaires. En 2013, un groupe sino-américain annonçait ainsi avoir utilisé des nanoparticules à base d'or pour transporter un antitumoral puissant (la doxorubicine). Les chercheurs y avaient attaché deux peptides : un capable d'enclencher la transcytose, et un autre se liant spécifiquement aux cellules tumorales. Ils avaient même doté une partie des nanoparticules d'un pigment fluorescent qui a pu signaler qu'elles avaient bien atteint leur cible. Les souris ainsi traitées ont vu leur tumeur régresser [3].

Anticorps à deux têtes. La synthèse chimique de telles structures multifonctionnelles reste cependant complexe et potentiellement coûteuse. C'est pour cela que Danica Stanimirovic, elle, s'est tournée vers des molécules se liant naturellement avec une grande spécificité à de nombreuses molécules : les anticorps, dont le rôle est habituellement de détecter les agents pathogènes grâce à des sites de reconnaissance situés au bout de leur « bras ». Cela fait des décennies que l'on sait fabriquer, par génie génétique (et donc à moindre coût), des anticorps pour cibler de nombreux tissus malades, comme les dépôts de plaques amyloïdes de la maladie d'Alzheimer ou des cellules tumorales. Mais si l'on injecte ces anticorps dans la circulation générale, moins de 0,1 % d'entre eux traverseront la barrière hémato-encéphalique.

Danica Stanimirovic a donc développé des anticorps bispécifiques : *« Ils sont dotés de deux bras : l'un cible un récepteur de la barrière hémato-encéphalique, qui va lui permettre de passer ; et l'autre cible le tissu contre lequel il est dirigé, dans le cerveau. C'est la technique du cheval de Troie. »* Plusieurs essais *in vitro* et chez l'animal ont permis de démontrer que ces anticorps à deux têtes, liés à un agent thérapeutique, sont effectivement internalisés par les cellules endothéliales et subissent une transcytose vers le cerveau [4]. Avec cette méthode, la chercheuse se propose de transporter à travers le cerveau une grande variété de molécules thérapeutiques, peptides, anticorps et enzymes… Mais les premiers essais cliniques sur l'homme ne seront pas engagés avant deux ou trois ans.

Toutes ces méthodes devront donc désormais faire preuve de sûreté et de leur efficacité pour soigner des malades. Nul ne sait en effet comment le cerveau s'adaptera à ces intrusions nouvelles, qu'elles soient le résultat d'un forçage physique (ultrasons) ou biochimique. Mais ce qui est sûr, c'est que la forteresse est devenue accessible. ■

[1] A.Carpentier *et al., J. Neurosurgery, 119,* 887, 2013.
[2] G. Leinenga et J.Götz, *ScienceTransMedicine, 7,* 278, 278ra33, 2015.
[3] H. Chen *et al, Theranostics, 3,*9, 633, 2013.
[4] G.K. Farington *et al, FASEB J., 28,* 4764, 2014.

Pour en savoir plus

> **tinyurl.com/researchgate-BBB** « Anatomie et physiologie de la barrière hémato-encéphalique » (articles en anglais).

> **tinyurl.com/ipcm-duprat** « Physiopathologie de la barrière hémato-encéphalique », cours en ligne de Fabrice Duprat, de l'Institut de pharmacologie moléculaire et cellulaire.

Une micropompe directement dans la zone à traiter

La difficulté à introduire des médicaments dans le cerveau a orienté certains chercheurs vers des solutions plus directes. L'équipe dirigée par Christophe Bernard, de l'Institut de neurosciences des systèmes, à Marseille, a ainsi mis au point une aiguille, vingt fois plus fine qu'un cheveu, capable d'instiller le médicament directement dans la zone du cerveau à traiter [1]. *« L'aiguille est formée d'une membrane organique composée d'ions chargés, qui attirent donc les médicaments souvent chargés positivement. La molécule active n'est pas diluée dans une solution, qui peut être toxique, mais insérée pure dans la membrane »,* décrit le chercheur. Une fois l'aiguille mise sous tension électrique, le flux d'électrons généré projette les molécules vers la zone cérébrale choisie, définie à l'échelle du neurone. Pour l'instant, le dispositif n'a été testé que sur des coupes de cerveau de souris. Mais il a déjà montré qu'il pouvait inhiber l'activation subite et excessive de cellules nerveuses qui caractérise une crise épileptique. Les futurs tests *in vivo,* sur des rongeurs, puis des primates, sont très attendus afin de déterminer si la technique pourrait être adaptée chez l'homme.

[1] A.Williamson *et al., Adv. Mat,* doi:10.1002/adma.201500482, 2015.

OFFRE SPÉCIALE La Recherche

Abonnez-vous et recevez ce livre

Pourquoi les manchots n'ont pas froid aux pieds ?
Et 111 autres questions stupides et passionnantes.

Ce livre comblera les lecteurs en affirmant à nouveau deux grands principes de la vulgarisation scientifique : le savoir n'est pas proportionnel au nombre de diplômes, et la science sans humour ni controverse est comme un jour sans soleil.

Par les lecteurs de la revue New Scientist (Traduit par Nicolas Witkowski)
Éditions Points Seuil - 224 pages - Prix public : 7,00 €.

1 an - 10 numéros + 1 numéro double :

5€ seulement par mois

Près de 25% de réduction !

BULLETIN D'ABONNEMENT

À retourner sous enveloppe affranchie à La Recherche - Service Abonnements - 4, rue de Mouchy - 60438 Noailles cedex

OUI, je m'abonne à La Recherche et je reçois le livre "Pourquoi les manchots n'ont pas froid aux pieds ?" (A29) :

☐ 10 n°s + 1 n° double pour **5 €** seulement par mois (*).
Je remplis le mandat de prélèvement SEPA ci-contre pour profiter de ce mode de règlement particulièrement avantageux.

☐ Je préfère règler en une seule fois **60 €** au lieu de ~~78,90~~ €.

Pour le règlement en une seule fois, je règle par :

☐ Chèque bancaire à l'ordre de La Recherche
☐ Carte bancaire

N° |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

Expire fin |_|_| |_|_|

Je note les 3 derniers chiffres du numéro inscrit dans la zone signature, au dos de ma carte |_|_|_|

Signature obligatoire

☐ M. ☐ Mme ☐ Mlle

Nom :

Prénom :

Adresse :

Code postal : |_|_|_|_|_| Ville :

Téléphone : |_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

Pour recevoir plus rapidement les informations relatives à votre abonnement, merci d'indiquer votre e-mail :

Si vous ne souhaitez pas être contacté par La Recherche et ses partenaires, cochez la case ☐

(*) Pour un minimum de 12 prélèvements. Au terme des 12 mois votre abonnement se poursuivra au même tarif préférentiel, et pourra être interrompu à tout moment par simple courrier.

Je peux acquérir séparément les numéros normaux au prix de 6€40, le numéro double au prix de 7€90, le livre *Pourquoi les manchots n'ont pas froid aux pieds ?* au prix de 7€. Offre réservée aux nouveaux abonnés jusqu'au 31/12/2015 et dans la limite des stocks disponibles.

Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des informations vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez cette case ☐.

MANDAT DE PRÉLÈVEMENT **SEPA**

PLRC503

En signant ce formulaire de mandat, vous autorisez La Recherche à envoyer des instructions à votre banque pour débiter votre compte. Vous autorisez également votre banque à débiter votre compte conformément aux instructions de La Recherche. Vous bénéficiez du droit d'être remboursé par votre banque selon les modalités décrites dans la convention que vous avez passée avec elle. Toute demande de remboursement doit être présentée dans les 8 semaines suivant la date de débit de votre compte. Vos droits concernant ce mandat sont expliqués dans une notice disponible auprès de votre banque. Il s'agit d'un prélèvement récurrent : le premier prélèvement sera effectué après l'enregistrement de votre abonnement.

Créancier
Sophia Publications - LA RECHERCHE
8, rue d'Aboukir - 75002 Paris

Identification du créancier
FR48ZZZ440981

Inscrivez VOS COORDONNÉES (merci d'écrire en majuscules)

Nom .....

Prénom .....

Adresse .....

.....

Code Postal |_|_|_|_|_| Ville .....

Indiquez LES COORDONNÉES DE VOTRE COMPTE (disponibles sur votre R.I.B.)

IBAN - Numéro d'identification international du compte bancaire

|_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_| |_|_|_|_|

BIC - Code international d'identification de votre banque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

N'oubliez pas de joindre un Relevé d'Identité Bancaire (R.I.B.).

À ..... Le ...../...../.....

Signature obligatoire

Sophia Publications - SA au capital de 9 115 568 € - 562 029 223 RCS Paris
Service abonnements : ✆ France : 01 55 56 71 15 - ✆ Etranger : 00 33 155 56 71 15
E-mail : abo.recherche@biwing.fr

La Recherche

Quand la chaleur devient quantique

La théorie du transport quantique de la chaleur régit les phénomènes thermiques à petite échelle. Des physiciens ont démontré expérimentalement un point crucial de cette théorie : l'existence d'une limite fondamentale aux flux microscopiques de chaleur.

PAR **Sylvain Guilbaud,**
journaliste.

La chaleur est un phénomène dont nous mesurons quotidiennement les effets. Les physiciens ont compris depuis longtemps qu'il s'agit d'une forme de transfert d'énergie, à l'instar du travail électrique ou mécanique. Mais comment s'écoule-t-elle dans un conducteur microscopique ? Une pierre angulaire de la théorie du transport quantique de la chaleur, posée au début des années 1980, fixe une limite maximale au flux de chaleur à travers un canal élémentaire de conduction thermique : le quantum de conductance thermique. Elle a été mise en évidence *in situ* récemment par une équipe du Laboratoire de photonique et de nanostructures du CNRS, à Marcoussis.

Cette prouesse expérimentale offre des perspectives fondamentales sur la compréhension des liens entre les notions de chaleur et d'information, mais laisse également entrapercevoir la possibilité de nouvelles machines thermiques fondées sur la manipulation quantique de la chaleur.

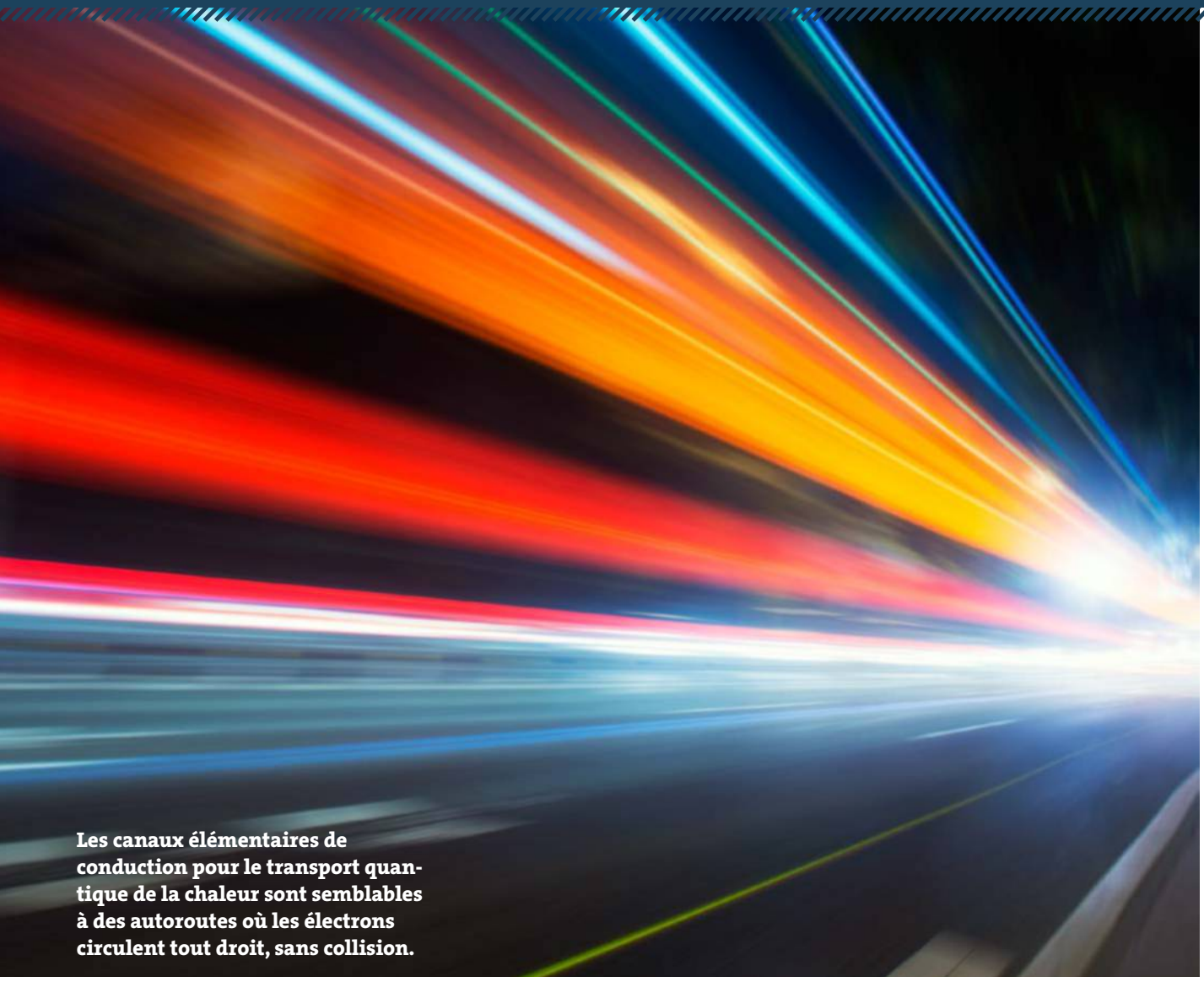
La physique classique, et la thermodynamique en particulier, a mis le transport de la chaleur en équation, notamment avec la loi de Fourier. Selon cette loi, le flux de chaleur entre deux surfaces est directement lié à leur différence de température. Le coefficient de propor-

L'essentiel

> À L'ÉCHELLE MICROSCOPIQUE, la chaleur suit les règles de la mécanique quantique et circule dans des canaux élémentaires de conduction.

> LA THÉORIE fixe une limite maximale universelle au flux de chaleur à travers un canal élémentaire de conduction. Cette limite a été récemment mesurée expérimentalement dans le cas où la chaleur est conduite par des électrons.

> CETTE EXPÉRIENCE ouvre la porte à d'autres expériences de manipulation quantique de la chaleur.



Les canaux élémentaires de conduction pour le transport quantique de la chaleur sont semblables à des autoroutes où les électrons circulent tout droit, sans collision.

XIE CHENGXIN/SHUTTERSTOCK

tionnalité étant la conductance thermique. La physique quantique brise la description continue de la conduction classique des matériaux. En langage de physicien, l'opposé de « continu » est « quantifié ». Ainsi, de la même façon que la physique quantique « quantifie » les niveaux d'énergie dans un atome (les électrons ne peuvent occuper que des états d'énergie séparés les uns des autres), elle quantifie en plusieurs canaux la circulation des particules dans un conducteur. Un peu comme sur une autoroute où la chaussée est séparée en plusieurs voies sur lesquelles roulent les voitures. Cela vaut pour la conduction de l'électricité, liée à la charge portée par les particules, et pour la conduction de la chaleur, liée à l'énergie des particules. Un courant électrique est provoqué par l'application d'une différence de potentiel aux bornes du conducteur. La conductance électrique est égale au quotient de ce courant électrique et de cette différence de potentiel. Un courant de chaleur, lui, est provoqué par une différence de température. La conductance thermique est égale au rapport de ce courant de chaleur par cette différence de température.

Limites imposées. Les particules circulant dans un canal de conduction quantique comme sur une autoroute, on pourrait penser que la conductance est infinie. En fait, comme le code de la route impose des limitations de vitesse aux voitures, la physique quantique impose une limite aux conductances électrique et thermique dans chaque canal. Ces bornes maximales, baptisées quantum de conductance électrique et quantum de conductance thermique, prennent leur source dans les fondements de la mécanique quantique. Deux principes en particulier sont à l'œuvre : le principe d'exclusion de Pauli, selon lequel deux électrons identiques ne peuvent pas se trouver dans le même état et ne peuvent donc pas circuler simultanément dans un canal de conduction, et le principe d'indétermination d'Heisenberg, qui limite le nombre de paquets d'énergie qui traversent un canal par unité de temps. Mais cette limite apparaît au niveau d'un canal unique. En général, il n'y a pas de borne à la conductance du matériau dans son ensemble, car plus l'objet quantique considéré est grand, plus il y a de canaux.

Il y a cependant une différence entre ces limites électriques et thermiques. Un bon conducteur d'électricité est souvent un bon conducteur de chaleur (les supraconducteurs font exception). Mais l'inverse n'est pas forcément vrai : il existe des conducteurs de chaleur qui ne conduisent pas l'électricité. En effet, les particules chargées ne sont pas ›››

Quand la chaleur devient quantique

››› les seuls vecteurs de chaleur. Ainsi, le rayonnement électromagnétique qui est constitué de photons électriquement neutres en est un autre. De même, les vibrations mécaniques des atomes qui forment le réseau cristallin d'un solide – les phonons – sont quantifiées et transportent aussi la chaleur.

Contrairement au quantum de conductance électrique, qui dépend de la nature des particules qui transportent le courant, le quantum de conductance thermique est le même quel que soit le mécanisme qui transmet la chaleur, que ce soit *via* des bosons (comme les phonons et les photons), des fermions (comme les électrons) ou même des anyons, qui sont des quasi-particules plus complexes que l'on rencontre dans les systèmes en deux dimensions. Sa valeur est donc vraiment universelle. Les constantes fondamentales mises à part, il ne dépend que de la température. En effet, la conductance thermique augmente linéairement avec la température, car chaque particule porte en moyenne plus d'énergie. Ainsi, à une température d'un kelvin (soit 1 °C au-dessus du zéro absolu), le quantum de conductance vaut théoriquement 1 millième de milliardième de watt par kelvin (1 picowatt par kelvin).

Le quantum de conductance électrique a été mis en évidence, théoriquement et expérimentalement, dès la fin des années 1980. En revanche, si les physiciens, et notamment John Pendry à l'Imperial College de Londres, avaient prédit le quantum de conductance thermique il y a plus de trente ans [1], sa mise en évidence s'est fait attendre. Jusqu'ici, elle avait été démontrée uniquement pour des phonons [2] et pour des photons [3]. Pour les électrons, seule une estimation d'ordre de grandeur avait pu être réalisée. *« Un des défis à surmonter réside dans le fait qu'il est bien plus difficile de mesurer d'infimes courants de chaleur que d'infimes courants électriques »*, explique Frédéric Pierre, chercheur au Laboratoire de photonique et de nanostructures. Avec ses collègues, ils ont publié la première détermination de la limite quantique du flux de chaleur dans un unique canal de conduction électronique, et déduit la valeur du quantum de conductance thermique avec une précision de l'ordre du pourcent [4].

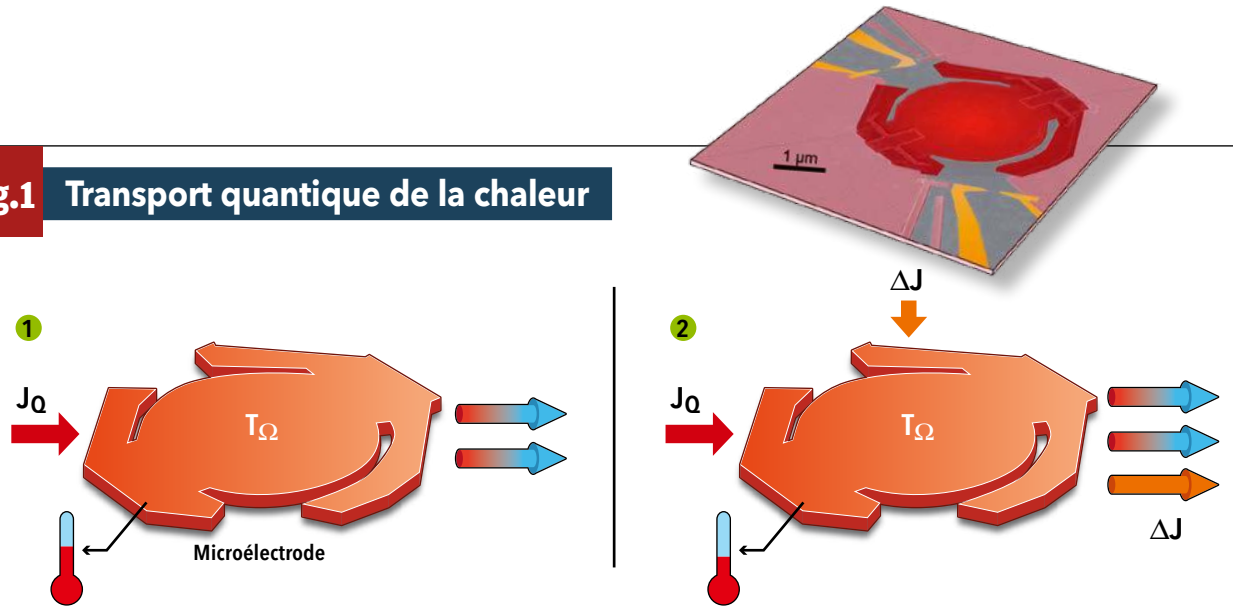
Avant de réaliser cette expérience, il faut disposer d'un conducteur quantique dont on contrôle le nombre de canaux de conduction – les voies d'autoroute pour électrons. Afin qu'un conducteur se comporte de cette façon, il doit préserver la nature ondulatoire des particules, autre clé de voûte de la physique quantique. Ce sont les interactions avec l'environnement qui diluent les phénomènes quantiques. En particulier, il faut que la taille du conducteur soit inférieure à la distance moyenne que parcourt une particule avant de percuter une de ses semblables. Cette distance est de l'ordre de quelques nanomètres à température ambiante.

Comme des bolides. Dans leur expérience, les physiciens sont descendus à une température de 20 millikelvins à l'aide d'un réfrigérateur à dilution. Les électrons conservent alors leur nature quantique sur une vingtaine de micromètres. *« De façon générale, la chaleur détruit les phénomènes quantiques à cause de l'agitation thermique. Les basses températures permettent de "geler" les interactions avec l'environnement. Pourtant, c'est bien la nature quantique de la chaleur que nous étudions et c'est cela qui est surprenant »*, souligne Frédéric Pierre. Les électrons qui servent de véhicules à la chaleur sont ceux d'un substrat de semi-conducteur auquel on applique un fort champ magnétique qui place les électrons de ce substrat dans des états particuliers. Le conducteur quantique – les autoroutes sur lesquelles circulent les électrons – est constitué de fines électrodes métalliques déposées sur ce substrat. Ces électrodes sont séparées par un goulet d'étranglement d'une centaine de nanomètres de large. En appliquant une tension électrique négative à ces électrodes, on repousse les électrons et on les force à passer par le goulet d'étranglement. La valeur de cette tension permet d'ajuster le nombre de voies de passage, c'est-à-dire le nombre de canaux de conduction quantique. Les chercheurs se sont assurés que ces canaux étaient parfaits en vérifiant que leur conductance électrique atteignait le maximum autorisé par la physique quantique. Les électrons s'y propagent en ligne droite de façon balistique, comme des bolides sur une voie à sens unique, sans collision ni perturbation.

Reste à mesurer la conductance thermique au niveau d'un canal. On dépose une microélectrode de métal sur le substrat de semi-conducteur. On la chauffe légèrement en appliquant une tension électrique. La chaleur s'évacue par les canaux de conduction quantique auxquels la microélectrode est reliée et dont on contrôle le nombre. On mesure alors la quantité de chaleur qu'il faut injecter dans la microélectrode pour maintenir sa température constante lorsqu'on ouvre un canal de conduction supplémentaire. Plus il y a de canaux ouverts, moins la température de la microélectrode est élevée, car la chaleur a plus de chemins pour s'évacuer. À une température de la microélectrode fixée, le flux de chaleur s'évacuant par un unique canal de conduction est la différence entre les puissances injectées pour obtenir cette température avec n et $n-1$ canaux ouverts. En divisant ce résultat par la différence de température aux bornes du canal, on en déduit sa conductance thermique. Les chercheurs ont constaté qu'elle coïncide, à quelques pourcents près, à la valeur maximale prédite par la théorie [Fig. 1].

« C'est une expérience remarquable qui a surmonté beaucoup d'obstacles, observe Antoine Georges, titulaire de la chaire de physique de la matière condensée au Collège de France. *En faisant la différence entre les puissances injectées pour obtenir une même température de la microélectrode avec* n *et* n–1 *canaux ouverts, les auteurs ont isolé le mécanisme d'évacuation de la chaleur par les canaux électroniques. Même à basse tem-*

Fig.1 Transport quantique de la chaleur



LE PRINCIPE DE L'EXPÉRIENCE de transport quantique de la chaleur par des électrons comprend deux étapes. ❶ La plaque de la microélectrode est chauffée en y injectant une quantité d'énergie donnée (J_Q). Cette énergie s'échappe par deux canaux et la plaque atteint la température d'équilibre T_Ω. ❷ On ouvre un canal supplémentaire qui évacue plus de chaleur, de sorte que la température de la plaque diminue légèrement. Pour maintenir la plaque à la température d'équilibre, il faut alors réinjecter une quantité d'énergie supplémentaire ΔJ, qui correspond au flux de chaleur qui est passé par le nouveau canal ouvert : c'est la limite quantique du flux de chaleur que les physiciens cherchaient à mesurer. En médaillon, l'échantillon utilisé dans l'expérience vu au microscope électronique : la microélectrode (colorée en rouge) et les grilles métalliques qui contrôlent le nombre de canaux ouverts (en jaune). INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

pérature, la chaleur de la microélectrode fuit par d'autres mécanismes, principalement via *les vibrations mécaniques, les phonons, ce qui aurait parasité la mesure. Ils se sont habilement affranchis de cette contribution. »*

Expérience avec des anyons. Un second défi instrumental consistait à mesurer les faibles variations de température (de l'ordre de quelques millikelvins) au niveau de la microélectrode. De telles mesures ne peuvent se faire avec un thermomètre classique, encore moins lorsque la zone concernée ne mesure que quelques micromètres et se situe au milieu d'un réfrigérateur à dilution. *« Nous avons déduit la valeur de la température à partir de la mesure des fluctuations de courant électrique dans la microélectrode. Il existe en effet un lien entre ces deux valeurs,* explique Sébastien Jezouin, qui a conduit cette expérience durant sa thèse. *Pour mesurer des fluctuations de l'ordre du picoampère, nous avons entièrement développé au laboratoire un amplificateur cryogénique doté d'un très bas niveau de bruit, au niveau de l'état de l'art dans ce domaine. »*

Cette expérience établit donc un des principaux résultats théoriques du transport quantique de la chaleur. Le sujet n'est pas clos pour autant. Pour conforter l'universalité du quantum de conductance thermique, de nouvelles expériences sont envisagées. *« Nous projetons de réaliser cette expérience non plus avec des photons, des phonons ou des électrons, mais avec des anyons, qui sont des objets plus complexes, des quasi-particules que l'on rencontre par exemple dans l'effet Hall quantique fractionnaire »*, indique Frédéric Pierre. L'universalité de cette limite fondamentale révèle d'ailleurs un lien profond entre le transport de chaleur et le transport d'information.

Un lien pointé dès les premières études théoriques sur le quantum de conductance thermique. La physique quantique prédit en effet que la transmission d'un débit d'information donné dans un canal de conduction nécessite de transférer au moins une certaine quantité d'énergie. On ne transmet pas d'information gratuitement. La limite au flux de chaleur que l'on peut faire circuler dans un unique canal de conduction équivaut alors à une limite sur le débit d'information que l'on peut, en théorie, transmettre avec une puissance donnée. *« Pour donner un ordre de grandeur, avec une puissance très faible de 1 nanowatt, on aurait au maximum un débit de 4,5 térabits par seconde, ce qui est déjà gigantesque ! Actuellement, cette limite quantique associée au transfert d'information est donc très loin d'être atteinte en pratique »*, précise Sébastien Jezouin.

À côté de ces questions fondamentales, les physiciens tentent désormais d'aller plus loin dans la manipulation quantique de la chaleur. Il s'agit, par exemple, de faire interférer deux courants de chaleur, un phénomène qui a déjà été réalisé dans des matériaux supraconducteurs. Deux courants de chaleur peuvent par exemple interférer destructivement et s'annuler, de la même manière que l'interférence de deux faisceaux lumineux peut produire des franges sombres. *« Dans le futur, ces recherches fondamentales pourraient aussi avoir d'autres applications,* imagine Antoine Georges, *par exemple pour générer des effets thermoélectriques qui permettraient de refroidir des composants électroniques directement à l'échelle du transistor. »* Pour l'heure, les recherches n'en sont encore qu'à l'élaboration des briques de base de tels systèmes. L'exploration quantique de la chaleur n'en est qu'à ses débuts. ■

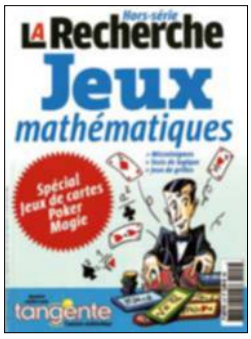
[1] J. B. Pendry, *J. Phys. A, 16*, 2161, 1983.
[2] K. Schwab *et al.*, *Nature, 404*, 974, 2000.
[3] M. Meschke *et al.*, *Nature, 444*, 187, 2006.
[4] S. Jezouin *et al.*, *Science, 342*, 601, 2013.

Découvrez notre choix de livres à offrir ou à vous offrir.

Jeux mathématiques et énigmes policière

Qu'apportent les mathématiques à la progression rigoureuse des enquêtes policières ? Des articles scientifiques tentent d'y répondre. Ils alternent avec des énigmes policières que vous serez amenés à résoudre avec pour seule arme votre ingéniosité.

Réf. LR09 **5,50€**



Jeux mathématiques Spécial jeux de cartes, poker, magie

Mathématiques et jeux de cartes, c'est un mariage naturel. Les mathématiques ont aussi un rôle fondamental dans nombre de tours de magie utilisant des cartes. En suivant les conseils donnés dans ces pages, vous en comprendrez les ressorts et éblouirez vos amis.

Réf. LR10 **5,50€**

Jeux mathématiques Spécial élections

Les sondages, les stratégies de votes, le découpage électoral n'auront bientôt plus de secrets pour vous. Plaisir de jouer, plaisir de comprendre, vivez un agréable divertissement avec les mathématiques électorales.

Réf. LR11 **5,50€**

Jeux - Testez votre intelligence

Dans ce numéro exceptionnel, les plus grands spécialistes des neurosciences font le point sur les dernières avancées, quitte à bousculer bien des idées reçues. Quant aux meilleurs créateurs de jeux, ils mettent en application sur près de 40 pages, toutes les facettes du jeu d'intelligence.

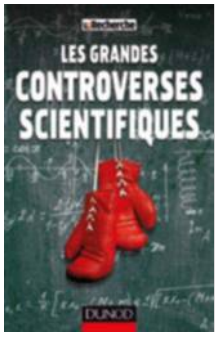
Réf. LR12 **5,50€**

Débusquer le hasard

Compilation d'articles parus dans La Recherche, cet ouvrage décrit 32 situations où mathématiques rime avec efficacité.

Réf. LR05 **16,00€**

- 5% soit **15,20€**



Les grandes controverses scientifiques

Ce livre raconte douze controverses qui ont accompagné les grandes découvertes scientifiques.

Réf. LR06 **14,50€**

- 5% soit **13,78€**

Dossiers Santé

100 idées reçues sur la santé dont il faut se méfier

Dans ce numéro spécial : des informations et conseils sur ce qui vous intéresse au plus haut point, votre santé.

Réf. LR07 **5,90€**

Le cœur

La Recherche et ses partenaires de la presse quotidienne régionale et de Belgique vous présentent ce « Dossier Santé » où l'information claire et accessible est validée par des spécialistes.

Réf. LR08 **4,90€**

@chetez 7 jours/7 sur sophiaboutique.fr

Votre commande atteint 49€ FRAIS DE PORT OFFERTS

Entrez la référence du produit (inscrite à côté de chaque article) dans le moteur de recherche et achetez en quelques clics.

Livraison à domicile rapide
NOUVEAU ! livraison en Point Relais

Paiement sécurisé

Satisfait ou remboursé

100% des articles en stock

LA Recherche votre magazine favori vous ouvre ses archives…

L'actualité des sciences

LE MAGAZINE
6,40€ le numéro

Année 2013

N° 475 mai 2013
Dossier : Voyage dans le futur.

N° 476 juin 2013
Dossier : Perturbateurs endocriniens. Comment ils menacent notre santé.

N° 477 juillet-août 2013
SPÉCIAL : Cerveau. Comment notre cerveau perçoit le monde ?

N° 478 août 2013
SPÉCIAL : 500 ans de controverses scientifiques.

N° 479 septembre 2013
Dossier : Energie noire. Pourquoi l'Univers accélère.

N° 480 octobre 2013
Dossier : Comment naissent les espèces.

N° 481 novembre 2013
Dossier : La science de Stephen Hawking.

N° 482 décembre 2013
Dossier : Big Data. Traitement massif des données.

Année 2014

N°483 janvier 2014
SPÉCIAL : Le top des 10 découvertes de l'année

N°484 février 2014
Entretien : Peter Higgs

N°485 mars 2014
Dossier : ordinateur quantique. Les physiciens testent les premières machines.

N°486 avril 2014
Dossier : Le génie d'Alexandre Grothendieck.

N°487 mai 2014
Dossier : T-Rex. Enquête sur la star des dinosaures.

N°488 juin 2014
Dossier : Bitcoin, la monnaie devient numérique.

N°489 juillet-août 2014
SPECIAL : La réalité n'existe pas.

N°490 août 2014
La bibliothèque idéale : les 40 livres de science indispensables.

N°491 septembre 2014
Dossier : Qui sont vraiment nos ancêtres ?

N°492 octobre 2014
Dossier : Incertitude quantique. La fin du principe d'Heisenberg ?

N°493 novembre 2014
Dossier : Comment savons-nous que nous sommes morts ?

N°494 décembre 2014
Dossier : Maths, les femmes prennent-elles le pouvoir ?

Année 2015

N°495 janvier 2015
Dossier : Les 10 découvertes les plus importantes de l'année.

N°496 février 2015
Dossier : L'origine de l'univers dévoilée.

N°497 mars 2015
Dossier : Stress, comment il modifie notre cerveau.

N°498 avril 2015
Dossier : Intelligence artificielle, jusqu'où iront les réseaux sociaux.

LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE
6,90€ le numéro

Année 2012

RD47 : Les énergies de demain
RD48 : Dieu et la science
RD49 : La mémoire
RD50 : Les plus belles énigmes de la science
RD51 : Les pôles, enjeu planétaire
SP01 : La naissance

Année 2013

SP02 : Les origines de la vie
SP03 : Les abysses
SP04 : Les particules élémentaires
SP05 : Jeux de mathématiques et de physique
SP06 : Addictions
SP07 : L'album de l'année 2013

Année 2014

NOUVELLE FORMULE

SP08 : L'intelligence artificielle
SP09 : Les nouvelles dimensions du son
SP10 : Piloter la machine par la pensée
SP11 : Internet, pour le meilleur et pour le pire
SP12 : La télévision du futur
SP13 : Comment les robots perçoivent le monde

Et pour conserver votre collection précieusement

➲ **l'écrin 12 numéros**
18€ seulement
(hors frais de port)

Bon de commande

À retourner sous enveloppe affranchie à LA RECHERCHE
BP 65 - 24 chemin Latéral - 45390 Puiseaux - ✆ 33 (0) 2 38 33 42 89 - nchevallier.s@orange.fr

V503

J'indique mes coordonnées :

Nom : Prénom :

Adresse :

Code postal : Ville : Pays :

E-mail :

Pour un meilleur suivi de votre commande et pour profiter de nos offres exclusives, merci de nous indiquer votre e-mail.

Oui, je souhaite recevoir dans les 10 jours la commande ci-dessous

Indiquez ci-dessous les numéros souhaités	Quantité	Prix unitaire TTC	TOTAL TTC
■ LA RECHERCHE - préciser le/les numéro(s) **6,40€**		6,40 €	€
■ LES DOSSIERS DE LA RECHERCHE - préciser la/les référence(s) commençant par RD et SP **6,90€**		6,90€	
■ L'écrin LA RECHERCHE 12 numéros **18€**		18,00 €	€
FRAIS DE PORT : France métropolitaine (Étranger, nous contacter) **1,50€ le** numéro / **+ 0,50€** le numéro supplémentaire			€
6,85€ l'écrin / **8,35€** de 2 à 3 / **9,10€** de 4 à 5 Au-delà de 5 écrins, nous contacter.			€
Total de ma commande (Frais de port inclus)			€

Je règle aujourd'hui par :

❒ chèque à l'ordre de *SOPHIA PUBLICATIONS* ❒ carte bancaire

N°

Je note aussi les 3 derniers chiffres du numéro inscrit au dos de ma carte bancaire, au niveau de la signature : Expire fin :

Signature obligatoire :

Votre commande sera expédiée à réception de votre règlement.

Loi informatique et libertés : vous disposez d'un droit d'accès et de rectification des données vous concernant. Elles pourront être cédées à des organismes extérieurs sauf si vous cochez la case ci-contre ☐

Reste-t-il des secrets de famille chez les hominidés ?

Les premiers représentants du genre *Homo* sont nés en Afrique il y a plus de 2,5 millions d'années parmi les hominidés. Des fossiles restent les seules traces de cette histoire méconnue, mais éclairée par de récentes découvertes.

PAR **Thibault Panis,**
journaliste.

Depuis début 2015, un grand nombre de découvertes ont bousculé la paléoanthropologie. La dernière en date : le groupe des hominines* s'est agrandi au début de l'été d'un nouveau membre, une espèce australopithèque qui vivait dans la région d'Afar, en Éthiopie, il y a entre 3,5 et 3,3 millions d'années. Au cours de prospections, des chercheurs américains ont exhumé quelques fragments de mâchoires et des dents. Selon l'équipe de Yohannes Haile-Selassie, du Muséum d'histoire naturelle de Cleveland, aux États-Unis, il ne fait aucun doute que ces fragments appartiennent à une nouvelle espèce qu'ils ont aussitôt baptisée *Australopithecus deyiremeda*, « proche parent » en langue afar [1]. Proche parent car, à la même époque, un autre type d'australopithèque arpentait la région : *Australopithecus afarensis*. Découverte en 1974 par une équipe de recherche internationale et datée de 3,2 millions d'années, Lucy en est la plus célèbre représentante.

Les deux espèces se ressemblent mais leur morphologie présente des différences. Les pommettes du *deyiremeda* sont plus avancées que celles de Lucy et son ramus, la branche montante de la mandibule, est placé plus en avant. Les *afarensis* avaient bel et bien un cousin proche mais d'une espèce différente.

Cette découverte enrichit notre connaissance de cette période cruciale, entre 4 et 2 millions d'années, où émerge notre genre. Autour de 3 millions d'années, les hominines sont en très grande majorité représentés par des australopithèques. Leur morphologie générale est celle d'hominidés primitifs, avec une taille avoisinant les 1,20 mètre, un poids dépassant rarement les 30 kilogrammes et un volume crânien d'environ 400 cm^3 (similaire à celui d'un chimpanzé actuel). Mais ils disposent également de traits plus modernes : une bipédie maîtrisée (quoique partielle, souvent couplée avec un mode de déplacement arboricole), un cerveau qui commence à se

*LES HOMININES (*Hominina*) constituent le groupe des hominidés auquel appartiennent les espèces du genre *Homo* ainsi que des espèces disparues comme les australopithèques.

S. ENTRESSANGLE, E. DAYNES/LOOK AT SCIENCES S. ENTRESSANGLE, E. DAYNES / LOOKATSCIENCES

La famille des hominines compte de nombreuses espèces. L'une des mieux documentées est celle des *Australopithecus afarensis*, au premier plan.

réorganiser et une structure de la main semblable à la nôtre. Entre 3 et 2 millions d'années, le genre *Homo* émerge et ses premiers représentants incontestables foulent l'Afrique autour de 2 millions d'années. Avec eux, le volume cérébral augmente ainsi que la taille globale du corps, la bipédie est franche et la mandibule perd de son volume par rapport à celle des australopithèques. Entre ces deux périodes, une succession d'événements évolutifs a conduit à l'apparition de ces traits nouveaux. La découverte incessante de nouveaux fossiles et l'élargissement des pistes de recherche éclairent d'un jour nouveau cette émergence.

L'identification d'*Australopithecus deyiremeda* confirme d'abord les soupçons des paléoanthropologues : il n'y a pas eu une lignée unique d'australopithèques. Au contraire, leur évolution a donné lieu à l'apparition, entre 4 et 3 millions d'années, de plusieurs espèces vivant parallèlement.

La mieux documentée d'entre elles est celle de Lucy, *Australopithecus afarensis*. Elle mesure environ 1,35 mètre pour les mâles et 1,10 mètre pour les femelles. Son volume crânien va de 380 à 500 cm^3, avec un front fuyant, une face sans menton et un prognathisme marqué, c'est-à-dire une forte avancée des mâchoires. Sa bipédie est attestée par un trou occipital centré à la base du crâne, dans lequel peut s'insérer verticalement la colonne vertébrale, ainsi que par la forme de son fémur. Néanmoins, les *afarensis* n'abandonnent pas totalement les déplacements dans les arbres, comme le suggère leur gros orteil divergent, propre à s'agripper aux branches, ainsi que la longueur de leurs membres antérieurs. La lignée des *afarensis* remonterait en fait loin dans le temps, en se fondant avec une autre espèce plus ancienne dont on retrouve des traces jusqu'à 4 millions d'années : *Australopithecus anamensis*.

Little Foot plus vieux que Lucy. À la même époque que *afarensis* et *deyiremeda* vivait une troisième espèce, d'une forme plus originale. En 2001, sur les rives du lac Turkana, au Kenya, Meave Leakey a exhumé un crâne appartenant à un hominine ancien, daté entre 3,5 et 3,3 millions d'années. Nommé *Kenyanthropus platyops*, il a une face plate, relativement moderne. Sa mâchoire est peu prognathe, mais il présente des traits semblables à ceux des *afarensis* : un crâne peu volumineux et un émail dentaire épais.

Il y a 3,5 millions d'années, au moins trois espèces peuplaient donc l'Afrique, en Éthiopie, au Kenya et en Tanzanie, mais aussi au Tchad. Rien n'affirme ›››

L'essentiel

› D'IMPORTANTES DÉCOUVERTES ont, ces derniers mois, fait progresser la connaissance des anciens hominidés dont est issue notre espèce.

› UNE GRANDE DIVERSITÉ d'australopithèques vivait en Afrique il y a entre 4 et 3 millions d'années.

› LE GENRE *HOMO* est apparu il y a entre 3 et 2,5 millions d'années en réponse à un changement climatique.

Reste-t-il des secrets de famille chez les hominidés ?

›››› pourtant qu'il s'agit du « berceau de l'humanité ». La distribution des fossiles, retrouvés nombreux dans ces pays, tient en effet davantage aux conditions de conservation des ossements qu'à la répartition réelle des espèces. En Afrique de l'Est, le sol est riche en dépôts sédimentaires propices à la conservation de fossiles. Et il est probable que d'autres régions d'Afrique ont abrité des hominines anciens sans que leurs restes ne résistent aux millions d'années qui les séparent de nous. L'Afrique du Sud a notamment donné lieu à des fouilles prometteuses.

C'est là qu'en 1994, Ronald Clarke a découvert un squelette exceptionnellement bien conservé dans une caverne à Sterkfontein. Nommé Little Foot, ce spécimen s'apparente à celui d'un australopithèque. Sa description précise est attendue pour la fin de l'année et apportera beaucoup d'informations. En avril déjà, une équipe internationale en a révélé quelques prémices. Sa datation à 3,67 millions d'années montre que Little Foot était plus vieux que Lucy ! Ce qui confirme que, très tôt, les australopithèques vivaient sur un territoire beaucoup plus large que l'Afrique de l'Est.

YOHANNES HAILE-SELASSIE

Cette mâchoire vieille de 3,5 à 3,3 millions d'années, trouvée dans la région Afar, en Éthiopie, appartient à une nouvelle espèce qui a été décrite en mai 2015, *Australopithecus deyiremeda*.

Outils de 3,3 millions d'années. Mais d'autres questions restent à résoudre concernant leur mode de vie et leur comportement. Comme le souligne le paléontologue néerlandais Fred Spoor dans un article publié dans *Nature* en mai 2015 [2], *« trouver une telle diversité taxonomique soulève des interrogations sur la manière dont plusieurs espèces ont pu coexister »*. Sur un vaste territoire s'étendant de l'Afrique du Sud à l'Afrique de l'Est et au Sahel, les conditions climatiques étaient variées, allant de zones forestières à des savanes plus ou moins boisées. Comment s'effectuait la répartition des niches écologiques entre deux espèces vivant au même endroit ? Partageaient-elles les ressources ou adoptaient-elles des stratégies différentes et complémentaires ? La réponse à ces questions se trouve en grande partie dans l'alimentation.

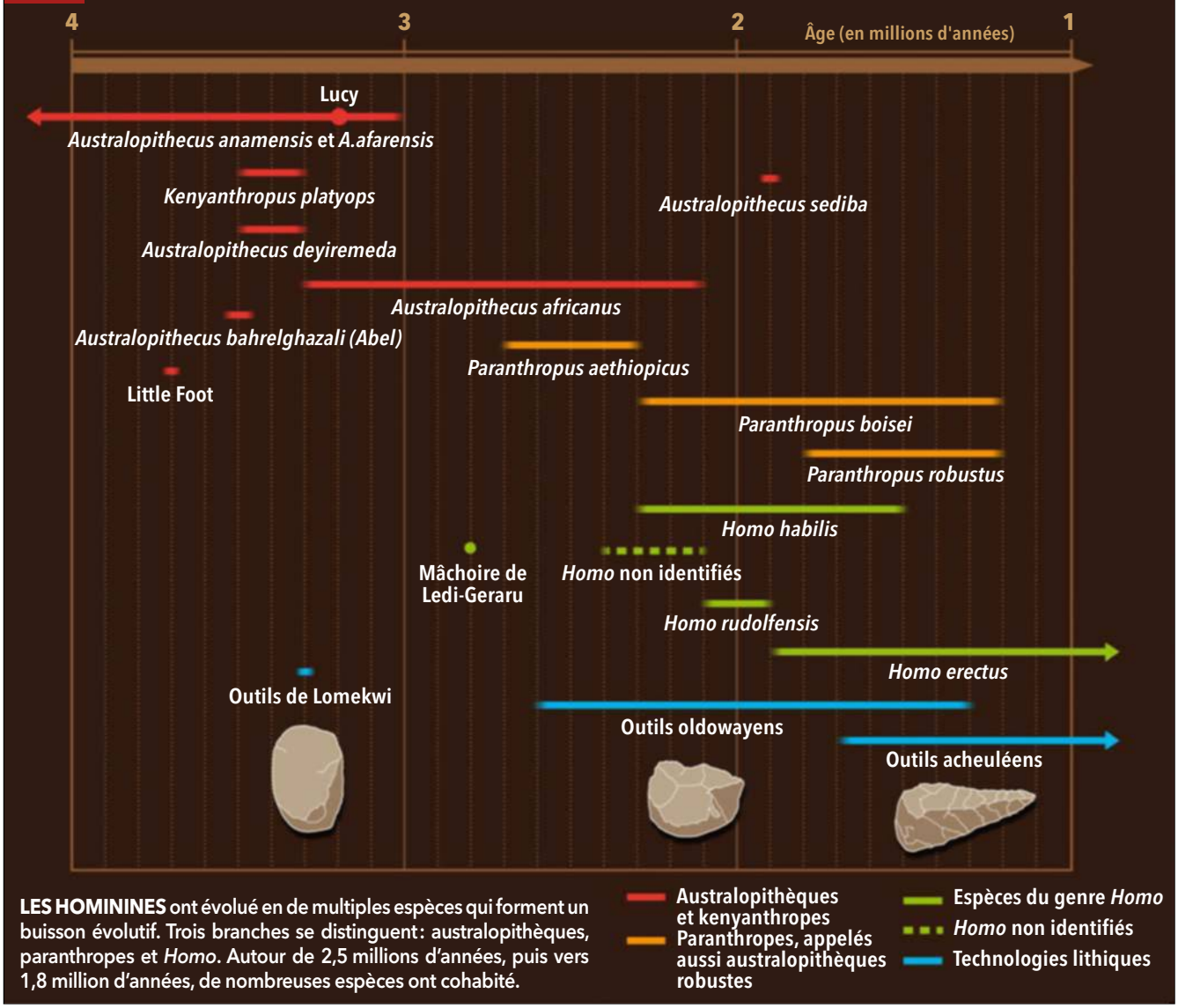
Pour comprendre de quoi se nourrissaient ces « pré-humains », les scientifiques ont recours à des techniques récentes qui permettent d'analyser la composition isotopique des dents. Les vestiges archéologiques sont également une précieuse source d'information. Il y a quelques semaines, l'équipe de Sonia Harmand, de la Maison de l'archéologie et de l'ethnologie René-Ginouvès, à Nanterre, a révélé la découverte, en juillet 2011, du site d'industrie lithique de Lomekwi, sur la rive ouest du lac Turkana, au Kenya. Elle a exhumé 149 outils de pierre datés de 3,3 millions d'années, c'est-à-dire bien plus tôt que l'apparition des premiers *Homo*, considérés jusqu'à présent comme les inventeurs de l'outil. En 2010, une autre équipe avait déjà identifié des traces de découpe sur des os trouvés à Dikika, en Éthiopie, d'un âge estimé à 3,4 millions d'années. Ces découvertes suggèrent que les australopithèques étaient capables d'extraire de la viande de carcasses à l'aide d'outils. Dans une certaine mesure, le comportement des anciens hominines pourrait donc déjà préfigurer celui des *Homo*, qui apparaissent entre 3 et 2 millions d'années.

Trois espèces d'*Homo*. Les premiers représentants du genre *Homo* se distinguent par l'accroissement de leur volume crânien (de 30 % plus élevé que chez les australopithèques en moyenne) et l'augmentation de leur poids et de leur taille. Les paléoanthropologues trouvent des fossiles leur étant associés en Afrique de l'Est et en Afrique du Sud. Mais leur aire de répartition est sans doute plus étendue, comme le suggère l'identification en 2014 d'une dent d'*Homo* ancienne provenant d'Ishango, en République démocratique du Congo.

En Afrique, il y a environ 2 millions d'années, trois espèces d'*Homo* vivent au même moment : elles forment des groupes parallèles dont les liens ne sont pas encore clarifiés [Fig. 1]. Cette classification ne fait pas totalement consensus mais elle rend compte des différences majeures entre les spécimens découverts à ce jour [3]. *Homo habilis,* pour commencer, dispose d'un volume crânien plus élevé que les australopithèques, supérieur à 700 cm^3. Son arcade dentaire en U, archaïque, possède une longue rangée de dents post-canines, de dimensions réduites par rapport aux australopithèques. Le reste du corps est semblable à celui d'un australopithèque, avec des membres antérieurs longs.

Les paléoanthropologues ont également identifié *Homo rudolfensis*, qui

Fig.1 Buissonnement des anciens hominines



LES HOMININES ont évolué en de multiples espèces qui forment un buisson évolutif. Trois branches se distinguent : australopithèques, paranthropes et *Homo*. Autour de 2,5 millions d'années, puis vers 1,8 million d'années, de nombreuses espèces ont cohabité.

INFOGRAPHIE : BRUNO BOURGEOIS

se distingue par une arcade dentaire aplatie à l'avant et par une face un peu concave en forme « d'assiette ». Enfin, *Homo erectus* apparaît il y a environ 1,9 million d'années et ses caractéristiques le rapprochent le plus de l'Homme moderne. D'une taille dépassant 1,50 mètre, son corps est taillé pour la bipédie et la course. Son front est fuyant et son crâne allongé vers l'arrière, mais son volume crânien est élevé et ne cesse de croître au cours du temps. Il est supposé être le premier *Homo* à avoir quitté l'Afrique et à s'être implanté dans plusieurs continents.

Au moment où émergent ces *Homo*, les archéologues relèvent l'apparition d'outils appartenant à une culture particulière : l'Oldowayen, vers 2,5 millions d'années. Il s'agit d'un ensemble de techniques visant à produire des éclats et des galets taillés sur une ou deux faces pour les rendre tranchants. Ces outils prouvent la capacité des hominines de l'époque à consommer des aliments plus coriaces : de la viande à débiter ou des végétaux à broyer. Les individus employant ces outils sont à même d'adapter leur régime alimentaire en fonction de leurs besoins et des contraintes auxquelles ils sont soumis. Cette technique est répandue, vers 2 millions d'années, probablement chez plusieurs espèces d'hominines différentes. Vers 1,8 million d'années, une deuxième culture émerge : l'Acheuléen. Les blocs débités sont plus fins, plus tranchants, jusqu'à former des bifaces reconnaissables en forme d'amande.

Le développement de ces pratiques autour de 2 millions d'années, associées à des caractères morphologiques, permet d'émettre des hypothèses sur le mode de vie des anciens *Homo*. L'augmentation globale de leur ›››

Reste-t-il des secrets de famille chez les hominidés ?

›››› taille par rapport aux australopithèques fournit un premier indice important. Cet accroissement suggère une nutrition améliorée par rapport aux hominines plus petits, ainsi qu'une réduction des risques liés à la prédation, aux maladies et aux blessures. Le développement du cerveau, surtout chez *Homo erectus*, est encore plus significatif. Un cerveau plus volumineux requiert l'augmentation de la consommation énergétique de l'organisme.

Toutes ces adaptations ne s'effectuent pas de la même manière et au même moment. Comme le rappelle Jean-Jacques Hublin, professeur à l'Institut Max-Planck, à Leipzig en Allemagne, où il a créé le département d'Évolution humaine, *« il n'y a pas de moment où, comme Adam, l'Humain émerge soudain, complet et formé »*. Ses traits apparaissent au contraire progressivement.

Pour comprendre la raison de cette émergence, il faut revenir à ses débuts, dans la période comprise entre 3 et 2,5 millions d'années. Une découverte est venue récemment éclaircir cette émergence. Dans une étude publiée dans *Science* en mars 2015, une équipe menée par Brian Villmoare, de l'université du Nevada, aux États-Unis, a identifié une mandibule fossile trouvée en Éthiopie, à Ledi-Geraru. Ses conclusions sont formelles : avec ses 2,8 millions d'années, cette mandibule est le plus ancien fossile du genre *Homo*. Avant cette découverte, le plus ancien représentant de notre genre n'avait pas plus de 2,33 millions d'années.

Pour Jean-Jacques Hublin, *« cette mâchoire comble à la fois le vide chronologique entre les* Australopithecus afarensis *et les* Homo*, mais aussi le vide morphologique. Elle partage des traits avec les deux genres même si, dans l'ensemble, cet individu devait beaucoup plus ressembler à un australopithèque qu'à un* Homo *! »* C'est donc à cette époque, entre 3 et 2,5 millions d'années, que sont apparus progressivement les premiers traits dits « dérivés », propres au genre *Homo*.

Stratégies adaptatives. Au même moment, vers 2,7 millions d'années, un autre genre apparaît : les paranthropes. Ils se distinguent des *Homo* par une mâchoire plus épaisse et des molaires massives, alors que la dentition des *Homo* tend à se réduire. Les mâchoires des paranthropes sont adaptées pour consommer des végétaux coriaces, comme des tubercules ou des racines. Leurs molaires massives leur permettent d'exploiter une grande diversité de ressources végétales. À l'inverse, la mâchoire des premiers *Homo* semble mieux adaptée à la consommation de viande. Les dimensions de leur mâchoire diminuent, mais leurs canines et incisives restent bien développées. *« Cette différence traduit deux stratégies adaptatives distinctes liées à l'alimentation »*, explique Jean-Jacques Hublin. Reste à expliquer la raison de ces spécialisations.

La théorie qui reçoit actuellement le plus de suffrages est celle de changements environnementaux. La divergence entre les paranthropes d'un côté et *Homo* de l'autre pourrait avoir été provoquée par un assèchement progressif de l'Afrique à partir de 3 millions d'années. Cette aridification a transformé les territoires en faisant disparaître les vastes forêts au profit de territoires plus ouverts, semi-boisés. Parallèlement, le climat serait devenu plus instable [3].

Dans ce contexte, les hominines ont dû adopter de nouvelles stratégies adaptatives. L'émergence des genres *Homo* et paranthropes tiendrait à cette nécessité. L'identification de la mâchoire de Ledi-Geraru a consolidé cette hypothèse. *« Avant cette découverte, notre scénario restait assez théorique. On imaginait une divergence entre les paranthropes et les* Homo*, entre 3 et 2,6 millions d'années, sous la pression de changements climatiques,* commente Jean-Jacques Hublin. *Mais pour cette période, nous ne disposions que de fossiles de paranthropes et aucun d'anciens* Homo*. On se doutait que ces derniers devaient déjà être individualisés mais il nous en manquait la preuve : un ancien* Homo *aussi vieux que les premiers paranthropes. »* Avec cette mâchoire, le schéma s'est complété d'une pièce manquante. ■

Homoplasie : des caractères transversaux

Chez deux espèces qui ne partagent pas d'ancêtre commun, des caractères très semblables peuvent émerger : c'est l'homoplasie. Par exemple, on trouve chez les fossiles d'australopithèques tardifs, comme *Australopithecus sediba*, des os du bassin similaires à ceux des espèces du genre *Homo*, bien qu'ils ne se situent pas sur la même branche évolutive. De la même façon, on pressent que les paranthropes ont pu, eux aussi, concevoir des outils. *« Chez les hominines, il y a tout le temps de l'homoplasie ! »* prévient Jean-Jacques Hublin, professeur à l'Institut Max-Planck à Leipzig. *Il s'agit d'espèces proches. La probabilité qu'elles répondent à des changements climatiques de manière similaire est donc grande. »* Les caractères morphologiques et comportementaux considérés comme « humains » ont donc pu se développer de manière transversale à travers plusieurs genres. *« Au lieu de discuter de l'absence ou de la présence de tel ou tel comportement, il est donc plus pertinent de discuter de sa fréquence, de son intensité et de son importance adaptative. »*

[1] Y. Haile-Selassie *et al.*, *Nature, 521*, 483, 2015.
[2] F. Spoor, *Nature, 521, 432*, 2015.
[3] S. C. Antón, *Science, 345,* 6192, 2014.

Pour en savoir plus

› T.Panis, « Le genre *Homo* a vieilli de 400 000 ans », *La Recherche*, mai 2015, p.12.
› T.Panis, « Mais qui a fabriqué les premiers outils ? », *La Recherche,* juillet-août 2015, p.8.

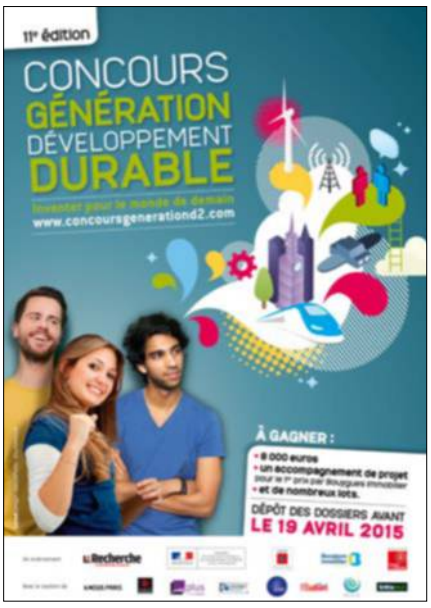
Les lauréats, qui posent ici aux côtés des membres du jury et de Sophie Coisne, rédactrice en chef de *La Recherche*, ont été récompensés pour des projets ambitieux et originaux. © THOMAS SALVA

11e concours Génération développement durable

Avec deux fois plus de partenaires et des candidats plus nombreux, le concours Génération développement durable s'impose comme un rendez-vous majeur pour entrepreneurs en herbe. Parmi eux, trois lauréats ont été distingués le 28 mai dernier.

« *Inventer pour le monde de demain.* » Jamais le concours Génération développement durable n'aura autant mérité son slogan qu'en 2015, au regard des dossiers étudiés par les dix membres du jury de sa 11e édition. L'audace et l'originalité étaient en effet particulièrement présentes dans les 64 projets présentés par près de 200 étudiants français ›››

Palmarès



CATSAÏ DESIGN/ISTOCKPHOTO/SHUTTERSTOCK

››› et francophones. Des projets guidés par le souci d'œuvrer pour des bonnes pratiques environnementales et portés par des ambitions entrepreneuriales fort à propos : la consommation durable, l'économie des ressources naturelles ou la réduction des déchets seront plus encore qu'aujourd'hui les préoccupations des entreprises de demain. Le 28 mai dernier, les trois lauréats se sont vu remettre chacun un chèque (de 3 500, 2 500 et 2 000 euros) et le vainqueur bénéficiera en plus d'un accompagnement de projet d'un an par la directrice du développement durable de Bouygues Immobilier.

Cette année, le financement du concours était assuré par cinq partenaires : l'Ademe, Bouygues Immobilier, la Caisse des dépôts, le ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et, bien sûr, le magazine *La Recherche*. Le cercle de soutiens était plus large encore : dix écoles, six universités, une dizaine d'entreprises, et un parrain, le photographe Yann Arthus-Bertrand. ■

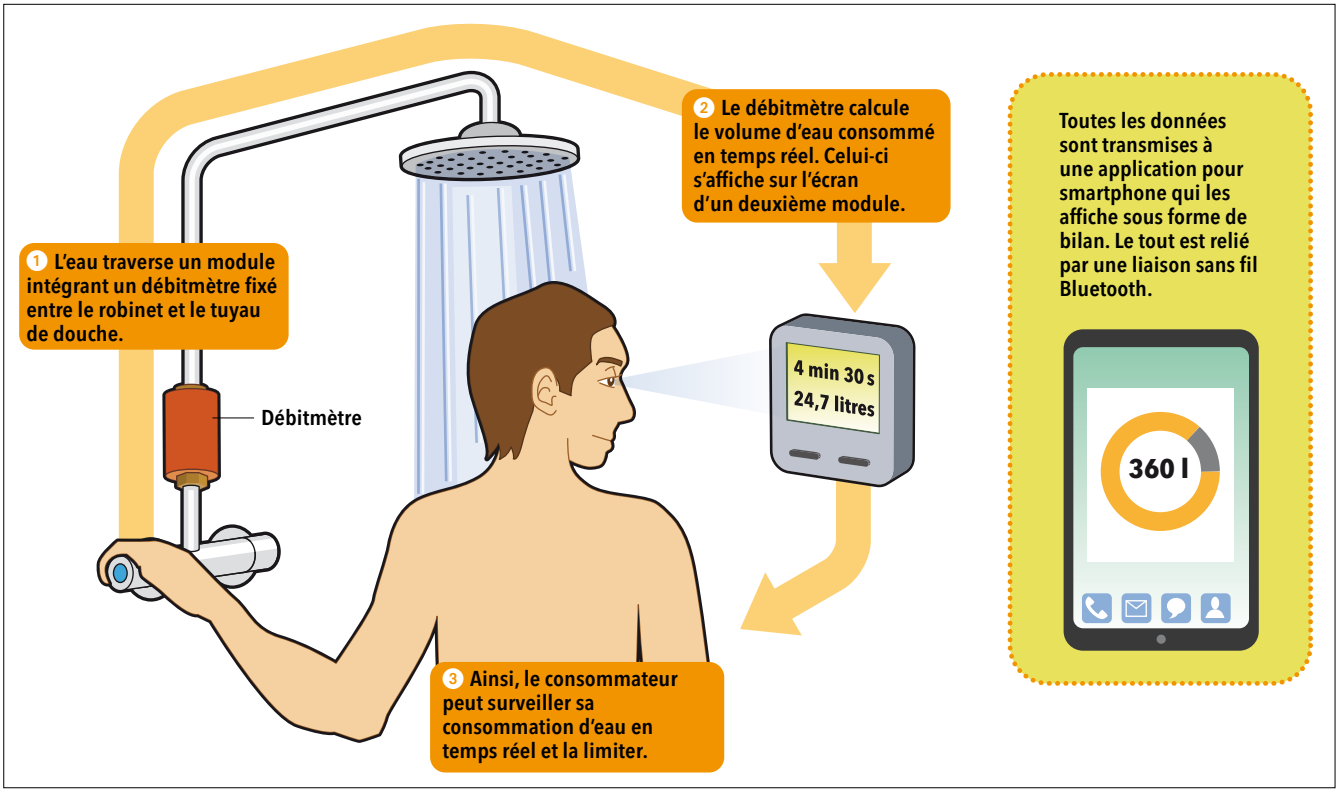
Hervé Cabibbo

Premier prix : projet « Naïad »

Visualiser sa consommation d'eau en temps réel

Pour traquer le gaspillage d'eau, six étudiants de l'école d'ingénieurs ECE Paris ont eu l'idée de traduire notre consommation d'eau en euros. Naïad, le dispositif qu'ils ont imaginé, s'inscrit dans la tendance de « quantification de soi », dont sont issus podomètres et bracelets connectés. Pourtant, il ne s'agit pas de mesurer sa propre activité mais plutôt sa consommation d'eau, et en temps réel.

Un premier module, étanche, se fixe entre le robinet (de la douche) et le tuyau, afin de calculer le volume d'eau consommé. Un deuxième, également étanche et relié au premier par une liaison sans fil Bluetooth, affiche sur l'écran intégré le coût correspondant en euros, mais aussi le temps passé, le volume et la température de l'eau. Enfin, une application pour



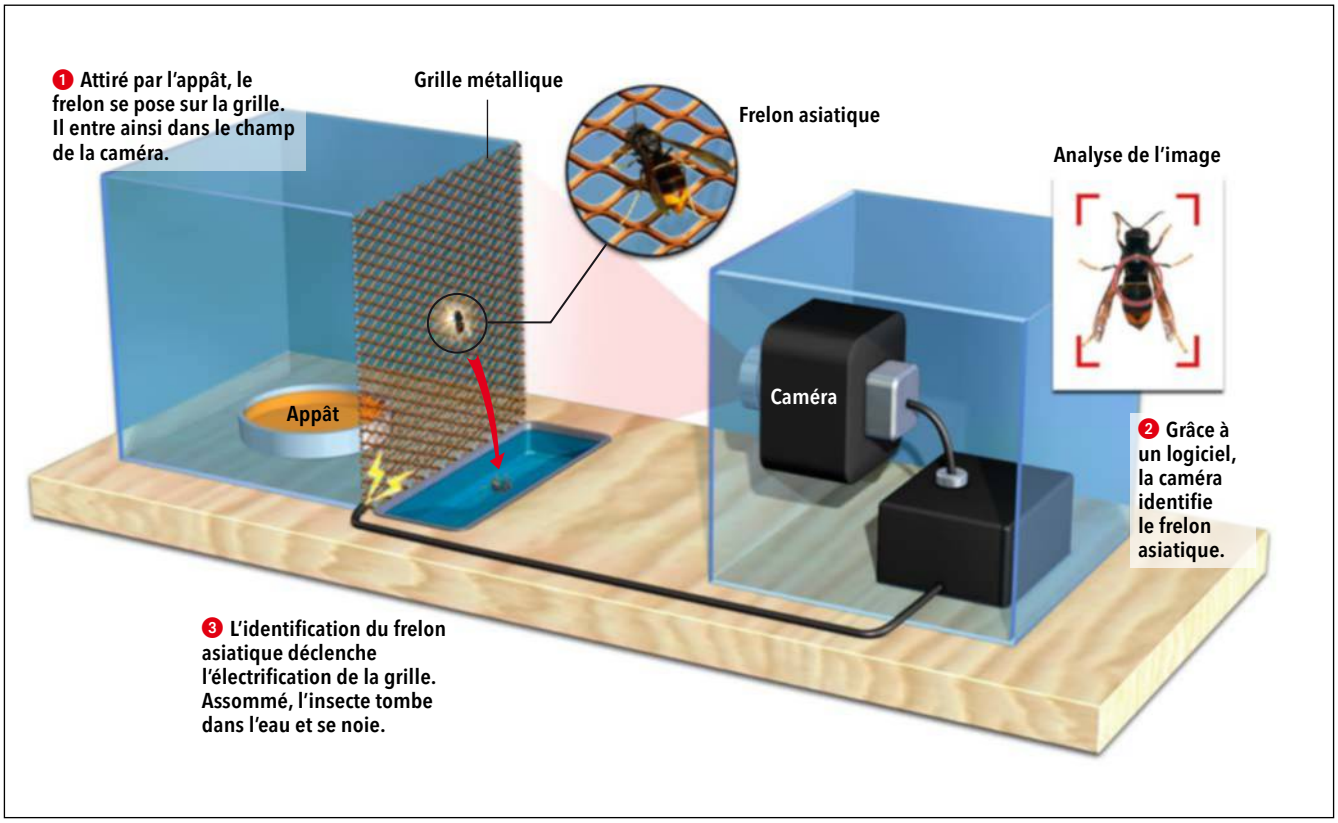
© INFOGRAPHIES : BRUNO BOURGEOIS

smartphone récupère, toujours *via* une liaison sans fil, les données générées chaque jour par les deux premiers modules, et présente l'ensemble sous forme de bilan.

Le projet inclut un certain nombre d'options, par exemple un système d'alerte qui déclenche une sonnerie lorsqu'un seuil de consommation est dépassé. « *Un tel dispositif de surveillance incite mécaniquement à ne pas laisser couler l'eau, c'est psychologique. Il induit instantanément une baisse de consommation* », constate Anaïs Dumont, une des lauréates, qui précise que le dispositif n'est pas pensé seulement pour les particuliers. « *Les collectivités, mairies ou régies immobilières pourraient tirer parti de tels dispositifs ; nous travaillons aussi dans cette voie.* » ■ **H. C.**

Deuxième prix : projet « Apipro »

Piéger les frelons asiatiques



Introduit en 2004 par erreur lors de l'importation de poteries chinoises dans le sud-ouest de la France, le frelon asiatique est un dangereux prédateur pour les colonies d'abeilles : une dizaine de frelons peuvent à eux seuls détruire une ruche entière. Aujourd'hui, l'insecte est présent sur 70 % du territoire français et son éradication devient urgente. Mais comment s'y prendre sans nuire aux autres espèces de frelons ? C'est à cette question que trois étudiants d'ECE Paris tentent de répondre avec Apipro, un piège « sélectif », car capable de distinguer différentes espèces. Comment ? En utilisant un système de reconnaissance biométrique couplé à une caméra.

Identification par caméra. Apipro se présente sous la forme d'un boîtier qui intègre une caméra et un système informatique, et donc un logiciel (conçu par les étudiants) chargé de l'identification : quand un insecte se pose sur la grille métallique verticale placée devant un appât constitué de bière et de sirop, le logiciel évalue *via* la caméra la quantité et la répartition de la couleur jaune qui recouvre son dos.

Si un frelon asiatique est identifié, la grille s'électrifie. Assommé, l'insecte tombe alors dans un récipient rempli d'eau et se noie. « *Lors de simulations, nous avons calculé que 60 % des frelons asiatiques sont détectés en tant que tels. Surtout, nous avons une erreur de seulement 15 % parmi les autres espèces,* précise Florantin Trellu, l'un des lauréats. *En adoptant une caméra plus performante, cette marge d'erreur pourrait être encore réduite.* » Le prix du piège calculé initialement, de l'ordre de 100 euros, serait dans ce cas à réévaluer de 20 à 25 %. ■ **H. C.** >>>

Troisième prix : projet « Hydr'Open »

Produire de l'électricité en zone rurale

En France, entre 50 000 et 100 000 anciens sites hydrauliques, disposant de petites chutes d'eau, sont éligibles à la « microhydroélectricité ». Autrement dit, ils sont capables de produire de l'électricité à petite échelle à l'aide de turbines. Le projet de cinq étudiants de l'école INP-ENSE[3] de Grenoble consiste donc à élaborer cette turbine à l'aide d'une technologie libre de droits, pouvant être construite avec des matériaux de récupération. Deux critères stratégiques pour une conception à la portée de toutes les bourses, et donc une large diffusion.

Solidarité internationale. La turbine développera dans un premier temps des puissances modestes, jusqu'à 20 kilowatts. Elle repose sur le modèle Banki (dont le brevet est passé dans le domaine public) et est prévue pour des sites qui disposent de petites chutes d'eau, de deux à quinze mètres, avec des débits de quelques centaines de litres par seconde. « *Nous souhaitons travailler en partenariat avec des ONG expérimentées au niveau local et international. Placer cette technologie au service de la solidarité internationale fait partie du projet initial* », rappelle Colin Pierdet, président de l'association étudiante Hydr'Open, à l'origine du projet.

Plusieurs associations (SOS Attitude, Électriciens sans frontières, We share the power) ont donc été approchées par les étudiants pour un développement en zone rurale et à l'étranger. Comment engranger des revenus qui permettraient de pérenniser l'activité ? « *Nous y travaillons, mais la formation à la construction et l'installation de turbines sont des pistes* », répond Colin Pierdet. ■ **H. C.**

DR

FRANK BIÉTRIX,
responsable de la majeure « Objets connectés, réseaux et services » à ECE Paris, école d'ingénieurs dont sont issus les projets Naïad et Apipro.

« Nous poussons nos élèves à se confronter avec l'extérieur »

Pouvez-vous nous présenter ECE Paris ?

F.B.: ECE Paris, initialement École centrale d'électronique, est une école privée fondée en 1919, juste après la Première Guerre mondiale, dans le but d'enseigner la technologie émergente que représentait à l'époque la TSF. Aujourd'hui, nous sommes une des principales écoles privées d'ingénieurs en France, qui a élargi ces dernières années son spectre d'expertise, notamment autour des différents métiers du numérique.

Deux des trois prix du concours Génération développement durable ont été gagnés par des étudiants de votre école. Comment l'expliquez-vous ?

F.B.: L'école a misé il y a quelque temps déjà sur ce que l'on appelle la « pédagogie par projet ». Ainsi, sur les deux dernières années d'études d'ingénieur, les élèves doivent concevoir un projet pluridisciplinaire par année, et par équipe de cinq. Tout projet doit avoir une dimension innovante dont il faut démontrer la valeur à l'extérieur de l'école. L'idée est de sortir le projet du cadre académique pour ne pas être seulement évalué par un jury d'enseignants. L'un des axes de cette valorisation, c'est justement la participation aux concours. D'abord, les élèves y gagnent en motivation et s'approprient beaucoup plus leur projet. Ensuite, ils doivent nécessairement dépasser le simple développement technique et travailler sur la confrontation avec l'extérieur. Par exemple, créer une communauté autour de leur projet, ou rechercher des cautions scientifiques ou économiques pour lui donner de la grandeur. En un mot, travailler le faire-savoir et pas seulement le savoir-faire. C'est un excellent stimulant.

Participer au concours Génération développement durable est donc une évidence ?

F.B.: C'est la troisième année que l'école participe à ce concours. Les deux années précédentes, nous avons envoyé beaucoup de candidats mais aucun, hélas, n'avait réussi à atteindre le podium. J'avoue que cette année, y parvenir était un peu mon objectif personnel ! C'est un concours très important pour nous parce qu'il existe depuis onze ans maintenant. De ce fait, il compte de nombreux participants et rassemble un jury d'experts qui ont l'expérience pour évaluer le potentiel d'un projet. Enfin, le développement durable est une thématique qui intéresse particulièrement nos élèves : nous avons une spécialisation autour de l'énergie et de l'environnement qui regroupe près du quart de notre promotion de diplômés. Cette double victoire a donc une saveur particulière. ■

Propos recueillis par Hervé Cabibbo

Dans le laboratoire de l'acidification des océans

La chute du pH des océans, liée aux émissions de CO_2, va entraîner la disparition massive d'espèces, dont celle des coraux.

Elizabeth Kolbert, *La Sixième Extinction. Comment l'homme détruit la vie,* La Librairie Vuibert, à paraître le 4 septembre, 352 p., 21,90 €.

« Nous entrons dans la sixième extinction de masse » titrait, le 19 juin, le site du magazine *Science*, faisant ainsi référence à une étude publiée le même jour [1]. Cette dernière fait écho à un livre qui sort ce mois-ci en France, prix Pulitzer 2015 de l'essai : *La Sixième Extinction. Comment l'homme détruit la vie.* Signé d'Elizabeth Kolbert, *« l'une de nos meilleures journalistes scientifiques »* selon Al Gore [2] [ancien vice-président démocrate des États-Unis, NDLR], l'ouvrage relate en 13 chapitres, à partir d'observations et de faits scientifiques, comment un grand nombre des espèces de notre planète sont touchées par des événements qui peuvent conduire à leur disparition. L'auteure va sur le terrain pour y rencontrer des scientifiques, observer les signes précurseurs de cette nouvelle extinction massive et comprendre les processus qui y mènent.

Écosystème déstabilisé. Parce que 70 % de la surface du globe est constituée d'océans, ils sont les principaux régulateurs de notre planète. Leur acidification, c'est-à-dire la baisse du pH en raison des émissions de CO_2, dues en grande partie à l'activité humaine, est l'un des processus en cours. À l'échelle géologique, les précédents épisodes d'acidification ont souvent été associés à l'extinction d'espèces se traduisant par une diminution très significative de la biodiversité, laquelle est revenue à son niveau « originel » après des centaines, voire des millions d'années.

L'altération puis la disparition rapide des organismes bio-calcifiants sensibles au pH que sont les coccolithophoridés, algues microscopiques, ou les coraux, pionniers d'écosystèmes marins vastes et structurés visibles de l'espace, prédisent une perte de la richesse naturelle, élément fondateur de la stabilité d'un écosystème. Les conséquences chimiques, biologiques, physiologiques de cette acidification sont multiples, mais convergent vers une réduction drastique du nombre d'espèces présentes dans ces biotopes marins. Pour comprendre la transition entre un écosystème océanique d'aujourd'hui et celui de demain, l'auteure nous emmène dans le golfe de Naples, où les eaux sont soumises à une augmentation brutale de CO_2 avec une incidence sur le pH marin.

Changer de comportement au quotidien, replacer l'homme au service de la planète et non pas l'inverse, c'est ce qu'Elizabeth Kolbert nous martèle dans ces pages. La démonstration est implacable. Malgré notre supposée grande adaptabilité, nous pourrions être une des espèces concernées par cette extinction. Toutefois, quelle que soit l'issue, la vie continuera sur la planète. ■

Dominique Lefevre, chercheur CNRS à l'Institut méditerranéen d'océanologie, à Marseille.

[1] G. Ceballos *et al., Science Advances,* doi:10.1126/sciadv.1400253, 2015.
[2] http://tinyurl.com/critique-al-gore

Dans le laboratoire de l'acidification des océans

ZOONAR/B.HALLHUBER/AGEFOTOSTOCK

J. HALL-SPENCER

Extrait

Depuis le début de la révolution industrielle, la quantité de combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) brûlés par l'homme a ajouté quelque 365 milliards de tonnes de carbone à l'atmosphère. La déforestation en a fourni 180 milliards de tonnes supplémentaires. Chaque année, nous en rejetons dans l'air environ 9 milliards de plus, une quantité qui s'accroît de 6 % annuellement, ce qui est énorme. Il en résulte que la concentration de gaz carbonique dans l'air aujourd'hui (un peu plus de 400 parties par million) est plus élevée qu'elle ne l'a jamais été au cours des 800 000 dernières années, et même très probablement au cours des derniers millions d'années. Si la tendance actuelle se maintient, la concentration de CO_2 dépassera en 2050 500 parties par million, soit environ le double de son niveau à la période préindustrielle. On s'attend à ce que cet accroissement conduise à une élévation de la température moyenne sur la planète de 2 à 4 °C, ce qui déclenchera toute une série d'événements modifiant la géographie du globe, par exemple la disparition de la plupart des glaciers restants, l'inondation des villes côtières et des îles dont le relief dépasse peu le niveau de la mer, ainsi que la fonte de la calotte polaire arctique. Mais ces événements ne représentent que la moitié de l'histoire en train de s'écrire.

Les océans couvrent 70 % de la surface de la Terre, et partout où l'eau et l'air entrent en contact, des échanges se produisent. Les gaz de l'atmosphère sont absorbés par l'océan, et les gaz dissous dans l'océan sont libérés dans l'atmosphère. Lorsque les deux phénomènes sont à l'équilibre, les quantités absorbées sont *grosso modo* identiques à celles qui sont libérées. Si l'on change la composition de l'atmosphère, comme nous sommes en train de le faire, l'échange se déséquilibre : la quantité de gaz carbonique entrant dans l'eau devient supérieure à celle qui s'en dégage. Autrement dit, l'homme ajoute sans cesse du CO_2 à l'eau des océans, à la manière des évents évoqués plus haut [du gaz s'échappe du fond de la mer à proximité de l'île d'Ischia, dans le golfe de Naples en Italie, NDLR], mais cet ajout s'effectue à partir du haut et non plus par le bas, et ce à l'échelle de la planète. En 2014, les océans ont absorbé 2,5 milliards de tonnes de carbone, et en 2015, on s'attend à ce qu'ils en absorbent encore 2,5 milliards de tonnes. Chaque jour, chaque citoyen américain injecte, en fait, un peu plus de 3 kilogrammes de carbone dans la mer.

La diminution de 0,1 point de pH signifie que les océans sont 30 % plus acides qu'en 1800

En raison de cette accumulation de CO_2 dans les océans, le pH de leurs eaux de surface a déjà baissé, passant d'une moyenne de 8,2 à 8,1. De même que l'échelle de Richter (pour les séismes), l'échelle des pH est logarithmique, de sorte qu'une minuscule variation numérique représente un très grand changement dans l'environnement. La diminution de 0,1 point de pH signifie que les océans sont maintenant 30 % plus acides qu'ils ne l'étaient en 1800. En admettant que l'homme continue à brûler des combustibles fossiles, les océans continueront à absorber du gaz carbonique et à s'acidifier de plus en plus. Si les émissions de CO_2 restent inchangées (scénario du « on continue comme d'habitude »), le pH de la surface des océans descendra à 8 d'ici le milieu de ce siècle et à 7,8 à la fin de celui-ci. À ce stade, les océans seront 150 % plus acides qu'ils ne l'étaient au début de la révolution industrielle.

En raison du CO_2 déversé par les évents, les eaux autour de Castello Aragonese [un rocher volcanique relié à l'île d'Ischia par un pont de pierre, NDLR] fournissent un aperçu,

BRUNO IACONO

Les eaux autour de Castello Aragonese, un rocher volcanique à proximité de l'île d'Ischia, dans le golfe de Naples (en haut à gauche) offrent une vision très précise de ce qui attend les océans à l'horizon 2100. En effet, le gaz qui s'échappe du fond de la mer à cet endroit (ci-dessus) entraîne une baisse du pH à laquelle de nombreuses espèces, tel ce *Hexaplex trunculus* (en bas à gauche), dont la coquille est rongée, ne peuvent s'adapter.

une « avant-première » presque parfaite, de ce qui attend de façon générale les océans. C'est la raison pour laquelle j'étais en train d'effectuer, en combinaison de plongée, le tour de cette île en plein mois de janvier, m'engourdissant progressivement à cause du froid. [...]

Installés dans des bacs au sein d'un laboratoire en sous-sol, les animaux que les deux biologistes [Jason Hall-Spencer et Maria Cristina Buia sont des spécialistes en biologie marine, NDLR] avaient collectés autour de Castello Aragonese semblaient à première vue inertes (à mon œil inexpérimenté, ils pouvaient même passer pour morts). Pourtant, au bout d'un moment, ils se mirent à agiter leurs tentacules pour rechercher de la nourriture. Il y avait une étoile de mer, amputée d'un bras, un morceau de corail assez grand et mince, ainsi que quelques oursins qui mouvaient leur test au moyen de dizaines de pieds ambulacraires filamenteux. (Chaque pied ambulacraire est mû par la force hydraulique, s'étirant ou se rétractant en réponse à la pression de l'eau.) Il y avait aussi une holothurie (ou concombre de mer) de 15 centimètres de long qui présentait une malheureuse ressemblance avec un boudin, ou pis, un étron. Ici, dans ce laboratoire froid, on pouvait clairement observer l'effet destructeur des évents sur les animaux marins recueillis dans leur voisinage. *Osilinus turbinatus* est un coquillage de la classe des gastéropodes (escargots), très répandu en Méditerranée, caractérisé par une coquille sur laquelle des taches quadrangulaires alternativement blanches et noires dessinent un motif évoquant une peau de serpent. Le spécimen présent dans le bac était dépourvu de tout motif ; la couche externe côtelée de sa coquille avait été rongée, laissant apparaître la couche lisse et entièrement blanche qui se trouve en dessous. La patelle *Patella caerulea* a la forme d'un chapeau chinois. Sur plusieurs des spécimens collectés, la coquille présentait de profondes lésions, au travers desquelles on pouvait apercevoir le corps mou couleur mastic du coquillage. On aurait dit que ces animaux avaient été trempés dans l'acide, ce qui, d'une certaine façon, était bien ce qui leur était arrivé.

« Dans la mesure où le pH du sang est quelque chose d'extrêmement important chez l'homme, nous dépensons une grande quantité d'énergie pour le maintenir constant, m'expliqua Hall-Spencer en haussant la voix pour couvrir le bruit de l'eau déversée en continu dans les bacs. *Cependant, certains de ces organismes inférieurs n'ont pas la capacité physiologique de faire la même chose. Ces animaux sont obligés de subir ce qui se passe dans l'environnement autour d'eux, et ils se trouvent ainsi poussés au-delà de leurs limites. »* [...] ›››

Dans le laboratoire de l'acidification des océans

››› À Castello Aragonese, les évents déterminent un gradient de pH. Sur la côte est de l'île, les eaux ne sont pratiquement pas affectées. On pourrait peut-être dire de cette zone qu'elle est comparable à la Méditerranée telle qu'elle se présente aujourd'hui. À mesure que l'on se rapproche des évents, l'acidité de l'eau s'accroît, et le pH décline. Hall-Spencer se dit que si l'on cartographiait en ce lieu la distribution des êtres vivants en fonction du gradient, on obtiendrait une préfiguration de ce qui attend les océans du monde entier. Ce serait comme de disposer d'une machine à explorer le temps sous-marine. [...]

Finalement, il réussit à convaincre suffisamment de personnes (dont Maria Cristina Buia) qu'il était sur la piste de quelque chose d'intéressant. Leur premier travail fut de réaliser une étude détaillée des niveaux de pH autour de l'île. Ils effectuèrent ensuite le recensement de tous les organismes vivants dans chacune des différentes zones de pH, ce qui consista à disposer des cadres métalliques le long du rivage et à enregistrer, à l'intérieur de ceux-ci, le nombre de moules, cirripèdes et patelles attachés aux rochers. Cette opération leur demanda également de rester des heures d'affilée assis sous l'eau à compter les poissons qui passaient.

Dans les eaux se situant loin des évents, Hall-Spencer et ses collègues trouvèrent une collection d'espèces méditerranéennes tout à fait typique. Elle comprenait : *Agelas oroïdes,* une éponge qui ressemble un peu à de la mousse d'isolation ; *Sarpa salpa,* un poisson appelé « saupe » qui provoque parfois des hallucinations ; et *Arbacia lixula,* un oursin de couleur noire. Parmi les autres organismes vivant dans la zone, il y avait aussi *Amphiroa rigida,* une algue rosâtre hérissée de pointes, et *Halimeda tuna,* une algue verte qui se présente sous la forme d'une guirlande de petits disques reliés les uns aux autres (le recensement avait été limité aux organismes assez grands pour être observables à l'œil nu). Dans cette zone dépourvue d'évents, soixante-neuf espèces d'animaux et cinquante et une de végétaux furent dénombrées.

Lorsque Hall-Spencer et son équipe installèrent leurs cadres métalliques plus près des évents, ils obtinrent des chiffres très différents des précédents. La balane commune, *Balanus perforatus,* est un cirripède grisâtre ressemblant à un minuscule volcan. Elle est répandue et très abondante de l'Afrique de l'Ouest au pays de Galles. Dans la zone de pH 7,8, qui correspond au pH qu'auront les mers dans un avenir proche, elle a disparu. *Mytilus galloprovincialis,* une moule d'un bleu noir, indigène en Méditerranée, est tellement adaptable qu'elle s'est établie dans de nombreuses régions du monde en tant qu'espèce invasive. Elle aussi était absente de la zone acidifiée. Comme l'étaient également : *Corallina elongata* et *Corallina officinalis,* deux espèces d'algues rougeâtres rigides ; *Pomatoceros triqueter,* un ver annélide vivant dans un tube calcaire de section triangulaire ; trois espèces de coraux ; plusieurs espèces de gastéropodes ; et *Arca noae,* un mollusque bivalve communément appelé « arche de Noé ». En tout, un tiers des espèces observées dans la zone dépourvue d'évents avaient disparu dans la zone de pH 7,8.

« Malheureusement, le plus grand point de basculement, celui à partir duquel l'écosystème commence à s'effondrer, est le pH moyen de 7,8, lequel sera atteint en 2100, selon les projections, m'exposa Hall-Spencer de cette façon toute britannique de s'exprimer avec retenue. *Donc c'est plutôt alarmant. »*

Depuis la publication en 2008 du premier article de Hall-Spencer sur les phénomènes liés aux évents, l'intérêt pour l'acidification des océans et ses conséquences s'est considérablement accentué. Des programmes de recherches internationaux ont été lancés et financés, tels que les programmes BIOACID (Biological Impacts of Ocean Acidification) ou EPOCA (European Project on Ocean Acidification), et des centaines, voire des milliers, d'expériences ont été entreprises. Ces dernières ont été menées soit à bord de bateaux, soit en laboratoire, soit dans des enclos appelés « mésocosmes » retenant un certain cubage d'océan naturel au sein duquel on peut faire varier toutes sortes de facteurs.

L'acidification des océans a joué un rôle dans au moins deux des cinq grandes extinctions

Les unes après les autres, ces expériences ont confirmé les risques liés à l'augmentation du taux de CO_2. Tandis que de nombreuses espèces s'en sortent apparemment bien, et même prospèrent au sein d'une eau de mer acidifiée, quantité d'autres en pâtissent. Certains des organismes dont on a montré qu'ils sont vulnérables à l'acidification, comme les poissons-clowns ou les huîtres du Pacifique, sont bien connus des aquariophiles ou des amateurs de fruits de mer ; d'autres ont des caractéristiques moins attrayantes (pour les yeux ou pour le palais), mais jouent probablement des rôles plus importants pour les écosystèmes marins. *Emiliania huxleyi,* par exemple, est un organisme unicellulaire microscopique du phytoplancton (un coccolithophore) qui protège son unique cellule par une couche de minuscules plaques de calcite. Vu sous fort grossissement, il ressemble à une sorte de création artisanale de fantaisie : un ballon de football couvert de boutons. Il est tellement répandu

Le Britannique Jason Hall-Spencer, spécialiste en biologie marine, a mesuré l'impact de l'acidification de l'océan sur la disparition des espèces, à partir d'observations réalisées autour de l'île d'Ischia, dans le golfe de Naples. Selon lui, le pH moyen de 7,8, à partir duquel l'écosystème commence à s'effondrer, sera atteint en 2100. DR

à certaines périodes de l'année qu'il donne à de vastes surfaces de l'océan une couleur laiteuse et qu'il est à la base de nombreuses chaînes alimentaires. *Limacina helicina* est une espèce de ptéropode, ou « papillon de mer », qui ressemble à un escargot muni de deux ailes. Il vit dans la région arctique et constitue une importante source de nourriture pour de nombreux animaux beaucoup plus gros que lui, tels que le hareng, le saumon et les baleines. Ces deux espèces (*Emiliania huxleyi* et *Limacina helicina*) paraissent être extrêmement sensibles à l'acidification : dans une expérience réalisée en mésocosme, *Emiliania huxleyi* a complètement disparu de l'enclos lorsqu'on a fait monter le taux de CO_2.

Ulf Riebesell est un biologiste océanographe qui travaille au Centre de recherche sur les océans « *Helmholtz-GEOMAR* » de Kiel, en Allemagne. Il a dirigé plusieurs grandes études sur l'acidification des océans, au large des côtes de la Norvège, de la Finlande et du Svalbard. Il a découvert que les groupes d'organismes qui s'en sortent le mieux dans les eaux acidifiées sont des organismes planctoniques tellement minuscules (moins de 2 micromètres de longueur) qu'ils forment leurs propres chaînes alimentaires microscopiques. Lorsque ses effectifs augmentent, ce picoplancton, comme on l'appelle, consomme davantage de substances nutritives, au détriment des organismes plus grands.

« Si vous me demandez ce qui va se passer dans l'avenir, je pense que, selon les meilleures preuves dont nous disposons, s'opérera une réduction de la biodiversité, me dit Riebesell. *Certains organismes extrêmement tolérants vont devenir plus abondants, mais la diversité va globalement chuter. C'est ce qui s'est passé à toutes les époques d'extinctions de masse majeures. »*

On dit quelquefois de l'acidification des océans qu'elle est le phénomène jumeau, « également funeste », du réchauffement climatique, ce qui est vrai dans une relative mesure, d'ailleurs peut-être pas si relative que cela, en ce qui concerne leur « égalité dans la malfaisance ». En effet, s'il est exact qu'on ne peut pas trouver de mécanisme unique expliquant toutes les extinctions de masse enregistrées dans les archives géologiques, le changement dans la composition chimique des océans semble être un facteur explicatif pouvant être invoqué dans de nombreux cas. L'acidification des océans a joué un rôle dans au moins deux des cinq grandes extinctions (celle de la fin du Permien et celle de la fin du Trias), et il est tout à fait possible qu'elle ait été un facteur majeur dans la troisième, celle de la fin du Crétacé. Il existe aussi de fortes preuves indiquant que l'acidification des océans est intervenue lors d'une extinction que l'on appelle « la crise du Toarcien » qui s'est produite il y a 183 millions d'années, au Jurassique inférieur ; des preuves similaires ont également été trouvées à la fin du Paléocène, il y a 55 millions d'années, lorsque plusieurs types d'organismes marins ont subi des pertes majeures.

« Ah, l'acidification des océans, m'avait prévenue Zalasiewicz [Jan Zalasiewicz, stratigraphe à l'université de Leicester, en Angleterre, NDLR] à Dob's Linn [en Écosse, NDLR]. *C'est un immense sale coup en préparation. »*

Pourquoi l'acidification des océans est-elle si dangereuse ? Il est difficile de répondre à cette question, ne serait-ce que parce que la liste des raisons en est très longue. Selon que les organismes sont capables ou non de réguler de façon stricte leurs mécanismes chimiques internes, l'acidification peut affecter des processus fondamentaux tels que le métabolisme, l'activité enzymatique et la fonction des protéines. Dans la mesure où elle changera la composition des communautés microbiennes, elle altérera la disponibilité de substances nutritives cruciales, comme le fer ou l'azote. Pour des raisons semblables, elle modifiera la quantité de ›››

Dans le laboratoire de l'acidification des océans

Les organismes dits biocalcifiants sont particulièrement vulnérables aux niveaux de concentration de CO_2 dans les océans qui sont attendus pour ce siècle. Ce groupe comprend non seulement des coraux, mais aussi des coquillages, des mollusques, des étoiles de mer, des oursins… également menacés. J. HALL-SPENCER

››› lumière traversant l'eau, et pour des raisons quelque peu différentes, elle changera la façon dont les sons se propagent (en général, on s'attend à ce que l'acidification rende les mers plus bruyantes). Il semble vraisemblable qu'elle favorisera la multiplication des algues toxiques. Elle affectera la photosynthèse (de nombreuses espèces de plantes sont susceptibles de bénéficier de l'élévation des taux de CO_2) et elle altérera les composés formés par les métaux dissous, les rendant, dans certains cas, toxiques.

Parmi la myriade des conséquences possibles de l'acidification, la plus importante est probablement celle qui concerne un groupe d'organismes appelés « organismes biocalcifiants » (ce terme s'applique à tout organisme construisant, à partir du carbonate de calcium minéral, une coquille ou un squelette externe, ou dans le cas des plantes, une sorte d'échafaudage interne). Les organismes biocalcifiants qui vivent dans la mer sont extrêmement variés. Ils comprennent les échinodermes, comme les étoiles de mer et les oursins ; les mollusques, comme les huîtres et les palourdes ; les cirripèdes, qui sont des crustacés. Beaucoup d'espèces de coraux sont des organismes biocalcifiants ; c'est de cette façon qu'ils peuvent construire ces structures imposantes que sont les récifs. De nombreuses sortes d'algues sont également des organismes biocalcifiants ; dans ce cas, elles paraissent souvent rigides ou cassantes au toucher. Appartiennent aussi à cette catégorie les algues de la famille des Corallinacées (de minuscules organismes qui croissent en colonies évoquant des pâtés de peinture rose), ainsi que les brachiopodes, les coccolithophores, les foraminifères et de nombreuses sortes de ptéropodes. On pourrait encore considérablement allonger cette liste. On a estimé que la biocalcification est une caractéristique qui est apparue indépendamment au moins une vingtaine de fois dans l'évolution, depuis le début de l'histoire des êtres vivants : il est en effet tout à fait possible que ce nombre soit encore plus élevé.

Du point de vue d'un observateur humain, la biocalcification ressemble un peu au travail de construction d'une maison, ou à l'alchimie. Pour construire leur coquille, ou leur exosquelette, ou leurs plaques de calcite, les organismes biocalcifiants doivent obligatoirement unir des ions calcium (Ca^{2+}) à des ions carbonate (CO_3^{2-}) pour former du carbonate de calcium ($CaCO_3$). Cependant, en raison des concentrations qui existent dans l'eau de mer ordinaire, les ions carbonate et calcium ne se combinent pas. Il faut donc, au niveau des sites où doit se réaliser la biocalcification, que les organismes modifient la chimie de l'eau et imposent, de fait, une chimie de leur cru. L'acidification des océans accroît, en premier lieu, le coût de la biocalcification, en réduisant le nombre d'ions carbonate disponibles. Pour reprendre la métaphore de la construction d'une maison, c'est comme si quelqu'un dérobait sans cesse vos moellons tandis que vous êtes en train de travailler. Plus l'eau est acidifiée, plus grande est l'énergie requise pour accomplir les étapes du processus de biocalcification. À partir d'un certain point, l'eau devient carrément corrosive et le carbonate de calcium, qui est un matériau dur, commence à se dissoudre. C'est pourquoi les patelles qui s'aventurent trop près des évents, à Castello Aragonese, finissent par avoir des trous dans leur coquille.

Les expériences en laboratoire ont indiqué que les organismes biocalcifiants seront frappés durement par la chute du pH de l'océan, et la liste des espèces disparues à Castello Aragonese confirme cette observation. Dans la zone où le pH est à 7,8, les trois quarts des espèces manquantes sont des organismes biocalcifiants. […]

Sur la totalité du gaz carbonique que l'homme a rejeté dans l'air jusqu'ici, un tiers environ a été absorbé par les océans. Cela correspond à 150 milliards de tonnes, un chiffre stupéfiant. Cependant, comme c'est le cas pour la plupart des caractéristiques de l'Anthropocène, ce n'est pas seulement l'ampleur du phénomène qui importe, mais également sa rapidité. […]

Si nous rejetions le CO_2 dans l'air beaucoup plus lentement, des processus géophysiques tels que l'érosion des roches seraient capables de contrer l'acidification. Dans les conditions actuelles, les rejets de gaz carbonique se produisent à un rythme beaucoup trop rapide pour que des phénomènes de ce genre se déroulant très lentement puissent y faire face. ■

PAR **Elizabeth Kolbert,** journaliste américaine spécialiste des questions liées à l'environnement. Elle travaille au *New Yorker* et a reçu en 2015 le prix Pulitzer catégorie « non-fiction » pour *La Sixième Extinction*. DR.

Le magazine des passionnés d'histoire

actuellement en kiosque

Portrait *d'un chercheur entrepreneur*

WILLIAMPARRA

Laurent Lévy est titulaire d'un DEA en physique de la matière condensée de l'ESPCI (Paris), d'un doctorat en physique-chimie spécialisé dans les nanomatériaux de l'université Pierre-et-Marie-Curie et du CEA, et d'un post-doctorat à l'Institute for Lasers, Photonics and Biophotonics de la State University of New York, à Buffalo. Il a été consultant pour des grandes entreprises ainsi que pour des start-up de biotechnologie. En 2003, il a cofondé Nanobiotix dont il est le président du directoire. Depuis 2012, il est aussi vice-président de la Plateforme technologique européenne pour la nanomédecine.

« Ma pensée fonction machine à expresso ! »

Laurent Lévy a cofondé en 2003 Nanobiotix, start-up de nanomédecine cotée en Bourse et destinée à améliorer le traitement du cancer.

Tout corps plongé dans un bain reçoit une poussée d'Archimède. Dans le cas de Laurent Lévy, il reçoit… une idée : utiliser les lois de la physique pour agir à distance sur des cellules. À l'époque, le jeune homme est en thèse dans un laboratoire parisien de biophysique. Il n'a pas encore rencontré son mentor, ni effectué son voyage initiatique aux États-Unis, ni fondé une société de nanomédecine cotée en Bourse, ni emménagé avec ses 50 employés dans un bâtiment de quatre étages à Paris. Non, à l'époque, il se contente de barboter dans son bain. Comme n'importe quel doctorant ayant une baignoire. À une différence près, lui *« percole »*.

« J'utilise souvent ce verbe, car il traduit bien ma façon de penser. » Le processus de percolation fait référence à ce qui se passe dans une machine à expresso : au début, la vapeur d'eau se diffuse lentement dans le café ; elle pousse dans toutes les directions ; puis, subitement, toute l'eau sort par une brèche. *« Ma pensée fonctionne de la même façon : j'apprends, j'accumule des informations, je pousse sur le système et, soudain, je percole. »*

Aux murs de son bureau, il y a quelques planches originales de BD et, sur une étagère, une sculpture étrange, sorte de tête de lézard affublé d'oreilles et d'arcades néandertaliennes. *« C'est moi qui l'ai fait,* s'amuse-t-il en s'asseyant dans le coin salon de la pièce. *J'aime sculpter : ça me détend. »* Il a les yeux clairs, le teint pâle, des bouclettes noires et, même assis, il semble grand. Au poignet, il porte deux bracelets fluo, un orange et un bleu : *« On les a fait fabriquer pour célébrer le passage en Bourse de Nanobiotix »* en octobre 2012, neuf ans après la création de sa start-up dont le premier produit capable d'amplifier la radiothérapie, le NBTXR3, est en passe de réussir sa dernière phase clinique, dans laquelle l'efficacité sur le patient est évaluée.

Né à Montreuil en 1971 de parents travaillant dans la finance et la comptabilité, Laurent Lévy se décrit comme le fils *« un poil cancre de la famille »*. Il a son bac au rattrapage, *« avec une moyenne de 10,2 »*, mais il se passionne pour la science, en particulier l'espace, l'infiniment grand. Pourtant, il s'inscrit à l'université en biophysique. *« À mesure que les années passaient, je m'améliorais »*, jusqu'à un déclic en DEA. *« C'est là que j'ai percolé, que j'ai vraiment compris qu'il y avait encore des choses à concevoir et que l'on pouvait aller chercher des réponses soi-même. »* En particulier, il repère un sujet émergent, les nanotechnologies. *« Ce pan de la science était complètement nouveau, même pas décrit dans les livres de science-fiction. Tout était à explorer. »*

À l'université, il repère un sujet complètement nouveau, où tout était à explorer

Contrairement à une idée répandue, ce qui relie les nanotechnologies, ce n'est pas tant l'échelle de grandeur qu'une notion de seuil. *« En dessous d'une certaine taille, les matériaux peuvent changer de propriétés physiques : ils se mettent à fonctionner comme s'ils étaient confinés. »* Par exemple, des nanomatériaux peuvent voir leurs propriétés magnétiques, optiques, conductrices, catalytiques, fondamentalement bouleversées.

Lorsqu'en 1994, Laurent Lévy devient le doctorant de Marie-Paule Pileni, professeure à l'université Pierre-et-Marie-Curie, le grand débroussaillage de la thématique n'est pas achevé. Son sujet de thèse est du coup très vaste : déterminer si un effet de taille survient au niveau du couplage optique-magnétique des matériaux. Comme tout est à faire, il imagine, fabrique et teste différentes

ne comme une

CYRIL ENTZMANN / DIVERGENCE

nanoparticules. « *Laurent était un étudiant très rigoureux,* se souvient Marie-Paule Pileni. *Là où les autres doctorants multipliaient les expériences à l'aveugle, lui prenait le temps de la réflexion.* » La scientifique ayant une vision très fondamentale de la thématique, elle invite un confrère aux vues plus appliquées à passer un mois dans son laboratoire. Il s'agit de Paras Prasad, professeur à la State University of New York, à Buffalo. Laurent Lévy lui parle de ses « *idées de salle de bain* » et, en retour, Paras Prasad lui propose un post-doctorat à Buffalo.

Des nanoparticules dans une cellule. C'est un tournant. Car outre-Atlantique, Laurent Lévy se sent plus libre : « *Tout le système éducatif français est régi par la contrainte et, au fond de moi, j'étais en rébellion contre cela. Aux États-Unis, ce carcan n'existe pas. Il n'y a plus d'autres barrières que celles que l'on s'impose soi-même.* » Aussi, en 1999, il décide de tester son idée : « *Je suis allé voir Paras, il m'a dit "ok", et je me suis mis au travail : c'était aussi simple que cela.* » De là vient son expérience fondatrice : après avoir placé des nanoparticules magnétiques dans une cellule, il montre qu'il est possible de déplacer le noyau cellulaire à distance avec un simple aimant.

Ainsi donc, la mécanique si complexe de la biologie peut être contrôlée par des lois physiques, très simples à utiliser. Il en tire des brevets et l'idée d'une approche médicale où les nanoparticules remplaceraient dans certains cas les substances actives. « *C'est là que réside l'originalité de son approche,* explique Elias Fattal, directeur de l'Institut Galien Paris-Sud, unité de recherche spécialisée en nanomédecine. *Jusque-là, les chercheurs pensaient à utiliser les nanoparticules surtout pour créer des transporteurs capables d'acheminer une substance active vers une zone spécifique de l'organisme. Pour Laurent Lévy, les nanoparticules sont elles-mêmes les médicaments.* » ›››

Cet ancien élève qui a décroché son bac de justesse est en passe de sortir le premier produit capable d'amplifier l'effet de la radiothérapie.

Portrait *d'un chercheur entrepreneur*

Laurent Lévy

WILLIAMPARRA

Son entreprise

Créée en 2003, Nanobiotix est une société de nanomédecine cotée en Bourse depuis 2012. Elle possède une cinquantaine de salariés et des locaux à Paris. Elle a une filiale aux États-Unis, dans la région de Boston, à Cambridge, et travaille en étroite collaboration avec l'entreprise taïwanaise PharmaEngine. Nanobiotix développe des nanoparticules injectables capables d'amplifier les effets de la radiothérapie.

Ses publications

Laurent Lévy est l'auteur de quatre publications fondatrices et détient plus de quinze types de brevets en nanomédecine, dont au moins dix couvrent les technologies citées dans cet article.

›››› Des médicaments en théorie universels puisque capables d'interagir avec les cellules quel que soit le code génétique de ces dernières.

Convaincu de l'intérêt de son approche, dès la fin de son post-doctorat, Laurent Lévy demande une bourse aux instituts américains de santé pour développer son projet. Mais ce dernier est jugé trop innovant. *« C'était trop tôt »*, dit-il. Alors il rentre en France, tourne le dos à la recherche académique qui, selon lui, ne recrute plus les meilleurs candidats, et devient consultant chez Altran. *« Je pensais à créer mon entreprise, donner vie à mon idée, mais je manquais de connaissances concrètes et de réseaux. »* Il utilise donc ses missions pour se former au monde de l'entreprise et à celui des nanotechnologies. Et en 2003, il fonde Nanobiotix.

« Au début, nous étions trois, dont le professeur de l'université de Buffalo. Notre capital était de 50 000 euros et il nous a fallu convaincre des investisseurs. Cela a été très long. » Son idée de départ est d'utiliser des nanoparticules pour perturber le fonctionnement des cellules cancéreuses à l'aide d'un champ magnétique. Mais en 2007, après quatre ans de recherche et de développement, il abandonne cette piste pour une voie plus prometteuse.

Savoir renoncer. Adieu le champ magnétique, bonjour les rayons X : l'objectif est désormais d'amplifier l'effet de ces derniers lorsqu'ils sont utilisés contre des cancers localisés. Comment ? En injectant dans la tumeur des nanoparticules d'oxyde d'hafnium. Ces particules de 50 nanomètres de diamètre absorbent les rayons X et multiplient localement par neuf la dose de radiothérapie reçue par les cellules cancéreuses. Ainsi, on augmente l'effet de la radiothérapie sans envoyer davantage de rayons sur le patient. Si elles ne sont pas toxiques, *« ces particules ne sont pas non plus dégradées par l'organisme,* remarque Elias Fattal. *Elles doivent être retirées après le traitement. »* Ce qui pour Laurent Lévy n'est pas tout à fait vrai : *« Dans certaines situations cliniques, elles seraient éliminées par l'organisme. Dans d'autres, elles peuvent être retirées lors d'une chirurgie d'extraction de tumeur. Quel que soit le cas, il s'agit de nanoparticules inertes, n'ayant aucune action lorsqu'elles ne sont pas soumises à radiothérapie. »* Des résultats très prometteurs sont obtenus sur un cancer nommé sarcome des tissus mous et le premier produit pourrait être autorisé en Europe à la fin de l'année prochaine.

Les clés de son succès ? Quelques concepts de base, de l'expérience et un bon sens commun. *« Sincèrement, le business, c'est moins dur que la science »*, affirme-t-il. Il explique qu'en science, il faut accumuler beaucoup de savoir et que le niveau d'incertitude est très élevé. Ce qui n'est pas le cas dans le monde de l'entreprise, *« sauf bien sûr lorsqu'on se lance dans les biotechnologies car, là, il faut justement gérer l'incertitude inhérente au développement scientifique »*.

Il ajoute que, pour réussir, il est important de savoir renoncer, comme il l'a fait en 2007. *« Le cerveau humain a tendance à s'automanipuler et il faut en avoir conscience »*, dit-il. *« Cette lucidité lui vaut parfois une étiquette de tueur,* explique Patrick Boisseau, président de la Plateforme technologique européenne pour la nanomédecine [l'ETPN en anglais, NDLR]. *Au sein de l'ETPN, nous accompagnons de jeunes entrepreneurs et Laurent, qui est le vice-président de la Plateforme, n'hésite pas à signaler les projets qui lui semblent sans avenir. Il ne le fait pas pour décourager les jeunes mais pour leur faire gagner du temps. »* Car le temps, c'est de l'argent, et l'ennemi des entrepreneurs débutants.

Une première succursale aux États-Unis et un partenariat avec une société taïwanaise

Laurent Lévy demande une pause. Il sort sur la terrasse, allume une cigarette et se met à raconter la croissance d'une entreprise : les débuts où il faut tout faire en parallèle, le travail à la maison, puis l'arrivée dans un bureau (pour lui en 2005), le temps de la débrouille pour fabriquer ses produits, le moment où l'on obtient son propre laboratoire (en 2008). Il parle de tout cela avec beaucoup de recul. Rien à voir avec l'émotion qui, en 2013, l'a submergé sur scène, lors d'une présentation TED et de l'évocation de la première injection de nanoparticules réalisée sur un patient en 2011 : *« Ce qui se passe aujourd'hui, ce n'est qu'une étape. Il reste encore du chemin à parcourir avant de soigner des millions de patients. »*

Certes. Mais si la route est encore longue, celle déjà parcourue ne l'est pas moins. Nanobiotix vient d'ouvrir une première succursale aux États-Unis et a aussi signé un partenariat avec une société taïwanaise, PharmaEngine. Un exemple que beaucoup rêvent de suivre. D'après une étude de Bionest Partners, en 2013, 500 start-up de nanomédecine s'étaient lancées rien qu'en Europe et pas moins de 122 nanoparticules à usage thérapeutique faisaient l'objet de tests cliniques. Le marché, lui, était estimé entre 97 et 129 milliards de dollars en 2016. À suivre donc. ■ **Viviane Thivent**

idées

84 **L'entretien du mois**
avec Erik Brynjolfsson
« La technologie rompt le contrat social »
Propos recueillis et traduits de l'anglais par Denis Delbecq

88 **Histoire de science**
Et l'abbé Haüy créa la cristallographie
par Éric Sartori

91 **Les livres**
La sélection de la rédaction de La Recherche

96 **L'agenda**
Les conférences et les expositions

98 **Curiosités**
Les insolites de l'actualité scientifique

La prospérité confisquée

« L'innovation numérique est source de progrès social », nous répète-t-on depuis deux décennies. Aujourd'hui, le doute s'installe. Nos supermarchés, nos usines, nos métros ou nos aéroports sont de plus en plus gérés par des machines qui se substituent à ceux qui y travaillaient. Demain, la voiture autonome ou les drones remplaceront chauffeurs et livreurs. Les algorithmes « intelligents » analyseront et conseilleront, voire écriront nos journaux. De quoi offrir une prospérité inédite à des entreprises fortes d'une poignée de salariés seulement. Partager cette prospérité avec ceux qui ont été exclus par les machines est donc l'équation à résoudre.

Hervé Cabibbo

ILLUSTRATION REMI MALINGREY

L'entretien du mois

La version française du Deuxième Âge de la machine, *qui aborde l'impact des technologies sur l'économie et le monde du travail, vient de paraître.* **Erik Brynjolfsson**, *coauteur du livre, explique comment celles-ci déstabilisent les équilibres établis depuis la révolution industrielle.*

« La technologie rompt le contrat social »

Erik Brynjolfsson est économiste au Massachusetts Institute of Technology, à Cambridge, aux États-Unis. Il dirige l'Initiative MIT sur l'économie numérique. Diplômé de Harvard et du MIT en mathématiques appliquées, sciences de la décision, et management de l'économie, il est auteur et coauteur de nombreux ouvrages sur l'économie numérique et l'impact des technologies de l'information.

LA RECHERCHE : Qu'appelez-vous « le deuxième âge de la machine » ?

ERIK BRYNJOLFSSON : Un âge qui sera, à terme, au moins aussi important pour l'humanité que la révolution industrielle. Le premier âge fait référence à cette dernière. Une période de mutations technologiques et de croissance économique sans précédent. À la fin du XVII[e] siècle, pour la première fois de notre histoire, le niveau de vie a commencé à croître très rapidement. La puissance apportée par la machine à vapeur puis l'électricité et le moteur à combustion interne nous ont permis de modifier l'apparence de notre monde. Aujourd'hui, un nouveau cap est franchi, avec des machines qui complètent notre cerveau. C'est le deuxième âge de la machine.

À quel moment cette révolution a-t-elle commencé ?

E.B. : Elle est apparue petit à petit avec les ordinateurs numériques au début des années 1960. Puis tout s'est accéléré, notamment quand, en 1997, le superordinateur Deep Blue d'IBM a battu Garry Kasparov aux échecs. Depuis cinq ans, nous assistons à des progrès saisissants en intelligence artificielle, en particulier dans ce qu'on appelle l'apprentissage automatique. Le premier âge de la machine a mis un siècle à produire tous ses effets ; nous estimons, avec mon coauteur Andrew McAfee, que le second ne produira son plein effet que dans plusieurs décennies, peut-être même un siècle.

L'innovation a toujours été de pair avec le développement humain. Qu'y a-t-il de différent ?

E.B. : L'innovation présente désormais trois caractéristiques inédites : elle est exponentielle, numérique et combinatoire. Le premier terme fait référence à la loi de Moore. Comme l'a prédit Gordon Moore, cofondateur d'Intel, en 1965, le nombre de transistors des puces électroniques double tous les dix-huit à vingt-quatre mois. Aujourd'hui, la console Playstation d'un enfant est plus puissante qu'un supercalculateur militaire des années 1990. Un smartphone est plus puissant qu'un gros ordinateur ne l'était il y a vingt ans. La machine à vapeur s'est elle aussi améliorée de manière exponentielle, mais sa performance ne doublait que tous les soixante-dix ans, soit un facteur quatre en cent quarante ans. Nous observons des progrès spectaculaires en termes de consommation des puces, de bande passante de télécommunications, de capacité de stockage et de nombreux autres paramètres des technologies de l'information.

En quoi le caractère numérique change-t-il la donne ?

E.B. : Nous pouvons aujourd'hui presque tout numériser. Une fois que quelque chose est représenté par des 0 et des 1, il acquiert trois propriétés intéressantes : on le copie à un coût presque nul, on le transmet de manière quasi instantanée et enfin, la copie d'un objet numérique est impossible à distinguer de l'original. C'est très différent de tous les biens et les services qui sont faits d'atomes et qui mettent en jeu de la main-d'œuvre. Tout cela crée une économie nouvelle, débarrassée de ses contraintes de capacité. N'importe qui peut accéder à un bien numérique comme Wikipedia pour presque rien. Quand ces biens appartiennent à quelqu'un, ils produisent souvent un effet de domination : le vainqueur rafle l'essentiel du marché. Des milliers de gens aident les contribuables à rédiger leur déclaration d'impôts ; mais si vous mettez au point un logiciel pour le faire, ›››

NELSON BARNARD/ GETTY IMAGES NORTH AMERICA/ AFP

Erik Brynjolfsson

« La technologie rompt le contrat social »

>>> il n'y a plus besoin de milliers d'acteurs : un, deux ou quelques outils peuvent fournir la totalité du marché, ce qui peut conduire à une grande concentration de revenus et de profits.

Vous évoquez aussi le caractère combinatoire de l'innovation…

E.B. : Avec l'électricité et la pompe, vous pouvez créer la réfrigération. Vous pouvez également combiner l'électricité avec d'autres innovations pour créer de nouveaux modes de transport. À 18 ans, un de mes étudiants a créé une application très simple pour Facebook en deux ou trois semaines. En quelques mois, des millions de personnes se sont mises à l'utiliser. Pourquoi était-ce aussi facile ? Parce qu'il s'est appuyé sur Facebook qui, lui, repose sur Internet, lequel s'est construit grâce à l'électricité et à une foule d'autres innovations. Tout cela ressemble à un jeu de Lego, avec des pièces que vous pouvez combiner à votre guise. Dans un jeu de 52 cartes, il y a « factorielle 52 » façons de les combiner [52 × 51 × 50… 2 × 1, NDLR]. C'est plus que le nombre d'atomes de l'Univers ! Plus vous avez de briques, plus le potentiel d'innovation est grand, dont nous n'explorons qu'une minuscule partie. Avec ces caractéristiques exponentielles, numériques et combinatoires, nous nous attendons à une explosion d'innovations.

Quelles sont les innovations marquantes de ces dernières années ?

E.B. : Bien des choses que l'on pensait difficiles pour une machine sont devenues plus faciles, notamment en termes de capacités motrices et sensorimotrices des robots, dans le traitement automatique du langage et dans la résolution de problèmes peu structurés. Dans ces trois types d'applications, les robots et les ordinateurs étaient encore très mauvais il y a seulement dix ans, mais ils progressent à grands pas. L'un des exemples les plus frappants est l'apparition de voitures autonomes. Aujourd'hui, elles roulent sur des autoroutes sans intervention humaine. Bien sûr, elles ne sont pas encore capables de circuler dans une ville encombrée comme Paris, mais les progrès sont très rapides. Dans le même domaine, il y a désormais des robots comme ceux de Rethink Robotics qui peuvent travailler aux côtés d'humains dans les usines, sans risque de les blesser. En matière de traitement du langage, les avancées sont spectaculaires. Quand une personne parle au téléphone dans la rue, il y a de bonnes chances qu'elle soit en train de parler à son téléphone, et non à un humain. Cela relevait de la science-fiction il y a seulement quelques années. Bien sûr, les machines sont encore loin d'être parfaites, elles font des erreurs. Mais nous sommes passés d'une époque où les machines étaient incapables de comprendre notre voix à une autre où elles interagissent au quotidien avec nous. Enfin, le type de problèmes que nous pouvons confier à une machine a beaucoup évolué. Jusqu'à présent, il fallait préparer des tâches très structurées, très linéaires, pour que les ordinateurs puissent les accomplir. Maintenant, des ordinateurs commencent à faire du diagnostic médical, à analyser les documents juridiques et même à écrire de courts articles sur des sujets sportifs ou financiers. IBM a appris à son ordinateur Watson à répondre aux questions déstructurées qui portent sur des événements people, la géographie, la science, la musique… si bien que Watson a remporté le célèbre jeu télévisé américain Jeopardy !

Comment l'impact économique du deuxième âge de la machine se mesure-t-il ?

E.B. : Bien des effets positifs de l'économie numérique ne sont pas visibles dans les statistiques, notamment sur la production de richesses. Prenez par exemple Waze, qui permet aux automobilistes de donner et de recevoir des informations sur le trafic routier avec leur téléphone. Waze a créé un écosystème fondé sur le partage gratuit d'informations. Comme il fonctionne sans échanges monétaires, comme Wikipedia, sa contribution au PIB est proche de zéro. Et pourtant, Waze comme Wikipedia participent au bien-être de leurs utilisateurs. Nous devons réinventer nos statistiques pour mesurer l'impact des biens et services gratuits sur le niveau de vie, qui profite au moins à certaines personnes. Mais cette révolution industrielle a aussi un effet délétère et sérieux. Depuis dix à quinze ans, la création de richesses et de PIB par habitant atteint des niveaux records, mais nous constatons aussi une baisse du salaire médian et du taux d'emploi. Pendant deux siècles, ces indicateurs ont grimpé en même temps que la production globale de richesses ; ils sont découplés depuis quinze ans. Avec Andrew McAfee, nous pensons que c'est un effet de la technologie. Il est fort possible qu'à l'avenir, des personnes, peut-être même une majorité, soient laissées au bord de la route tandis que la taille du gâteau continue d'augmenter. Nous observons une rupture dans le contrat social implicite qui faisait que depuis deux siècles, tout le monde profitait de la croissance. Il apparaît même une fracture au sein des populations les plus aisées, les 1 %

les plus riches. 1 % de ces 1 % possèdent beaucoup plus que les autres, grâce à l'économie numérique qui profite à quelques acteurs seulement.

Qu'observe-t-on sur le marché du travail ?

E.B. : Si on réalise un diagramme avec les salaires en abscisse et l'offre d'emploi en ordonnée, on constate que le marché du travail prend la forme de courbe en U. Il se polarise aux salaires les plus faibles. Beaucoup de métiers se portent bien comme les serveurs, les cuisiniers, les jardiniers, les femmes de ménage, les plombiers ; bref tous ceux qui fournissent un service personnalisé et difficile à automatiser. À l'autre bout de la courbe, les métiers créatifs, les entrepreneurs, les gens de médias, résistent également. Mais parmi les salaires médians, là où la plupart des gens exercent une activité routinière de gestion d'information, il y a de moins en moins de demandes. Ce qui se traduit par moins d'emplois et par des salaires plus faibles. D'autres activités, pour lesquelles les robots sont compétents, disparaissent carrément, comme dans les usines automobiles ou d'électronique.

Face à un robot compétent pour une tâche, peu d'humains peuvent lutter, même avec de très bas salaires

Cette polarisation touche-t-elle l'ensemble des pays du globe ?

E.B. : Bien sûr. En Chine, par exemple, l'emploi est et sera affecté par les robots. Bien plus qu'en Europe et aux États-Unis où beaucoup de métiers routiniers ont déjà disparu. Ainsi, le patron de Foxconn, qui fabrique les produits d'Apple en Chine, a l'intention d'installer un million de robots dans ses usines. Je ne sais pas s'il y parviendra mais les robots réduiront fortement l'offre d'emplois routiniers en Chine et dans les pays émergents. De fait, une fois que vous avez construit un robot compétent pour une tâche, peu d'humains peuvent lutter, même avec de très bas salaires. Cette stratégie de main-d'œuvre bon marché a conduit de nombreux pays au succès dans la seconde moitié du XX^{e} siècle : elle y a élevé le niveau de vie et fait reculer la pauvreté. Mais cela ne suffira plus au XXI^{e} siècle. De la même manière que les économies occidentales ont été contraintes de le faire, tous les pays devront former leur main-d'œuvre pour réussir la transition vers le deuxième âge de la machine.

Quels sont les emplois les plus touchés ?

E.B. : Difficile de le savoir, puisque la plupart des innovations qui marqueront les décennies à venir n'ont pas encore été inventées. Mais on peut imaginer que de plus en plus de métiers routiniers vont être automatisés. Beaucoup d'emplois de haut niveau seront touchés. Prenez l'analyse des documents juridiques, faite par de jeunes juristes et avocats. Aujourd'hui, un ordinateur peut fouiller des millions de documents numérisés pour dénicher les plus pertinents concernant une affaire en cours. Ils sont moins chers et plus efficaces que les humains ! Comme l'ordinateur Watson d'IBM, des machines commencent à participer au diagnostic médical et peuvent fournir du conseil financier. Elles deviennent par ailleurs beaucoup plus performantes pour manipuler les objets : par exemple pour décider du moment où il faut cueillir une pomme de son arbre. Dans ses mines australiennes, Rio Tinto utilise des camions sans conducteur et des extracteurs automatiques. Le nouveau défi de robotique lancé par la Darpa, l'agence scientifique du Pentagone, porte sur la conception d'un humanoïde capable de monter et de descendre des escaliers, de manœuvrer le volant et les pédales d'un véhicule, de ramasser des objets sur le sol et de marcher sur des terrains accidentés. Des choses que seuls les humains pouvaient accomplir il y a peu. Il est facile d'imaginer que des entrepreneurs vont combiner ces aptitudes pour mettre au point des robots capables de travailler dans des entrepôts et des usines qui font encore appel à du personnel humain.

Que restera-t-il à l'être humain ?

E.B. : Heureusement, beaucoup de choses. Tout d'abord, de nombreux métiers sont fondés sur les relations humaines : le soin aux malades, aux enfants, le coaching, la vente… Pour ces métiers-là, l'interaction humaine est préférée à la machine. Les gens doivent en outre développer leur savoir-faire et orienter leur carrière vers les domaines où les machines ne sont pas performantes. Nous devons réinventer nos méthodes d'apprentissage et de formation pour aider les gens à suivre leur passion et leur créativité. Notre époque crée une économie de vainqueurs : ceux qui considèrent leur travail seulement comme un travail connaîtront des lendemains difficiles, j'en ai peur. La technologie est seulement un outil qui offre plus de possibilités que jamais pour changer le monde. C'est à nous de décider si on utilise la technologie pour créer des inégalités ou pour redessiner une prospérité partagée. Cela dépendra des investissements que nous ferons dans l'éducation, la santé et la culture. Le choix est entre nos mains.

■ **Propos recueillis et traduits de l'anglais par Denis Delbecq**

Pour en savoir plus

> Erik Brynjolfsson et Andrew McAfee, *Le Deuxième Âge de la machine*, Odile Jacob, 2015.

Auteur d'un traité de minéralogie et de dizaines d'autres ouvrages autour de l'étude des cristaux qui font encore référence, **René Just Haüy** *a été un précurseur de la cristallographie, aujourd'hui un peu oublié. Son parcours n'en reste pas moins singulier.*

Et l'abbé Haüy créa la cristallographie

Éric Sartori, ingénieur de l'École supérieure de physique et de chimie de Paris. DR

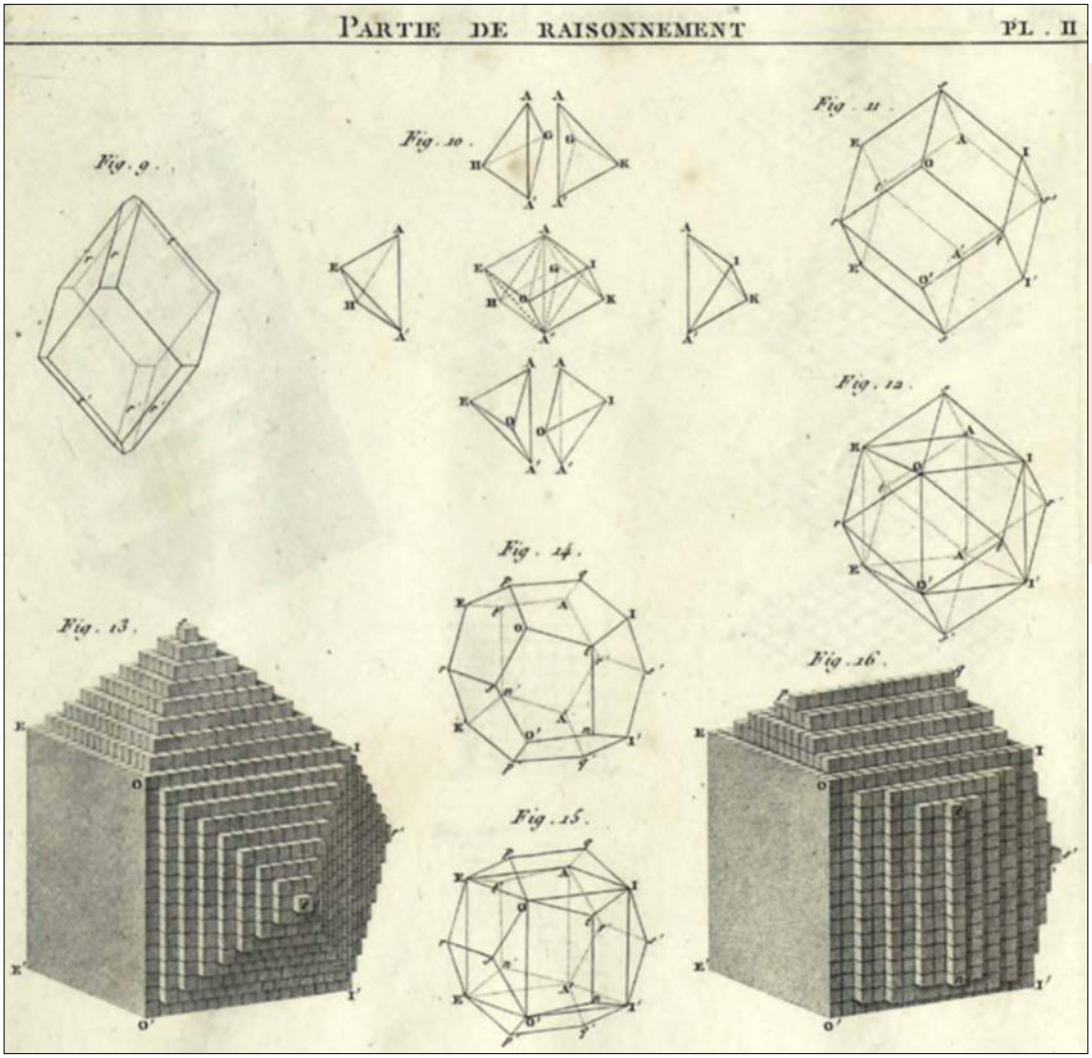
Qu'est-ce qu'un cristal et quelles sont ses propriétés ? À cette question, un homme d'Église apporte un début de réponse dès la fin du XVIII[e] siècle, posant ainsi les fondements de la science de la cristallographie. Il se nomme René Just Haüy. D'origine modeste, il est remarqué dès son plus jeune âge pour sa vivacité d'esprit, ce qui le mènera à Paris où il décrochera une bourse d'étude au collège de Navarre. Nous sommes alors en 1755 et il n'a que 12 ans. Son intérêt pour les sciences naît à cette époque des leçons de physique de l'abbé Jean Antoine Nollet puis de celles de Mathurin Brisson. Il devient pourtant professeur de latin et de grammaire dans ce même collège avant d'être ordonné prêtre en 1770. Nommé plus tard au collège du Cardinal-Lemoine, il se lie d'amitié avec l'abbé Charles Lhomond qui l'initie à l'herboristerie et à la botanique.

Haüy casse tous ses cristaux. Partout, il retrouve une structure fondée sur les mêmes lois

C'est un peu par hasard qu'il s'intéresse aux cristaux. Lors d'une promenade au Jardin du roi (actuellement Jardin des plantes), tout proche du collège, il assiste à une leçon de minéralogie donnée par le naturaliste Louis Daubenton. Et c'est une révélation. René Just Haüy *« s'étonnait profondément de cette constance dans les formes des fleurs, des fruits, de toutes les parties des corps organisés, et ne concevait pas que les formes des minéraux, beaucoup plus simples et pour ainsi dire toutes géométriques, ne fussent point soumises à de semblables lois »*, raconte l'anatomiste Georges Cuvier en 1861 dans son *Recueil des éloges historiques. « Il se demandait comment la même pierre, le même sel pouvaient se montrer sous forme de cubes, de prismes, d'aiguilles, sans que leur composition ne change d'un atome, tandis que la rose a toujours les mêmes pétales, le gland la même courbure, le cèdre la même hauteur et le même développement. »*

Une heureuse maladresse. Un hasard le conduit vers la réponse à ces questions. Alors qu'il examine la collection de minéraux d'un de ses amis, Monsieur Defrance du Croisset, Haüy, raconte Cuvier, *« eut l'heureuse maladresse de laisser tomber un beau groupe de spath calcaire cristallisé en prisme. Un de ces prismes se brisa de manière à montrer sur sa cassure des faces non moins lisses que celles du dehors, et qui présentait l'apparence d'un cristal nouveau tout différent du prisme pour sa forme »*. En examinant le fragment sous tous ses angles, il découvre à sa grande surprise un rhomboïde : une figure géométrique à six faces dont chaque face est un parallélogramme, exactement comme dans le spath d'Islande, variété transparente de calcite.

De retour chez lui, Haüy casse un, deux, puis trois cristaux de calcite, « dent de cochon » et autres « lenticulaires ». À chaque fois, un rhomboïde apparaît en son centre et des rhomboïdes plus petits s'en détachent. Intrigué par sa découverte, Haüy s'attaque à toute sa collection ; ses cristaux comme ceux qu'il a reçus de ses amis, éclatent sous le marteau. Partout, il retrouve une



UNIVERSITÉ DE TORONTO

Cette planche est extraite du *Traité de minéralogie* publié en 1801. Avec cet ouvrage, René Just Haüy est le premier à décrire ce qu'est un cristal : un assemblage de molécules semblables juxtaposées, depuis le centre jusqu'à la surface.

structure fondée sur les mêmes lois : des molécules constituantes identiques, un noyau toujours semblable et des lames ou couches accessoires produisant toutes les variétés. Dans le grenat, le noyau est un tétraèdre ; dans le spath fluor, c'est un octaèdre ; dans la pyrite, c'est un cube ; dans le gypse, dans le spath pesant, des prismes droits à quatre pans… Et si c'était là le vrai principe de l'état cristallin ?

Un fauteuil à l'Académie. Haüy fait part de sa découverte à Daubenton puis au mathématicien Pierre-Simon Laplace, qui l'encouragent à présenter un mémoire à l'Académie des sciences. Ce qu'il fait à partir du 10 janvier 1781 avec son Mémoire sur la structure des grenats suivi du Mémoire sur le spath calcaire. En 1783, nombre d'académiciens, notamment Lagrange, Laplace, Lavoisier, Fourcroy et Berthollet, le propulsent en un temps record à l'Académie, à la première place vacante – un fauteuil de botaniste, mais peu importe ! Cependant, cette nomination fait des envieux. C'est avec peu de plaisir que le minéralogiste Jean-Baptiste Romé de l'Isle voit débarquer Haüy dans un domaine qu'il considérait comme sien. Romé de l'Isle, militaire, prisonnier en Inde à la suite de la malheureuse expédition de Lally-Tollendal, s'y était en effet constitué une remarquable collection de cristaux. En 1772, il publiait une *Cristallographie* dans laquelle il faisait passer de quarante à quatre cents le nombre des formes décrites. Puis l'homme s'est lancé dans une description systématique des formes cristallines pour laquelle il fait fabriquer un goniomètre (appareil de mesure des angles) d'une précision inédite. En 1783, dans sa seconde *Cristallographie,* il énonce la loi de constance des angles : « *Les faces d'un cristal peuvent varier dans leur figure et dans leurs dimensions relatives ; mais l'inclinaison respective de ces mêmes faces est constante et invariable dans chaque espèce.* »

C'est dans ce contexte que Romé de l'Isle commente l'arrivée de Haüy. Il moque l'homme d'Église qu'il décrit comme un « *novateur en cristallographie, s'imaginant avoir fait une grande découverte* ». Il le traite de « *cristalloclaste* », ›››

Et l'abbé Haüy créa la cristallographie

››› et avertit : « *Tenons-nous en donc à ce que l'observation nous présente, si nous ne voulons pas substituer les rêves de notre imagination au silence majestueux de la Nature sur les grands principes.* » Le programme de Romé de l'Isle reste simple : continuer inlassablement à décrire. « *Je crois qu'avant de chercher à pénétrer le travail secret de la Nature, il faudrait commencer par étudier toutes les variétés de formes dont une espèce est susceptible* », assène-t-il.

Comprendre les mécanismes. À la démarche purement empirique et descriptive de Romé de l'Isle, Haüy oppose en 1784, dans son *Essai d'une théorie sur la structure des cristaux,* une ambition plus élevée, puisqu'il invoque la création d'une véritable science : « *On peut se proposer deux choses dans l'étude des cristaux : l'une, de tirer de leurs différentes formes, des caractères distinctifs, pour reconnaître les minéraux ; l'autre, de comparer ces formes les unes avec les autres, d'en saisir les rapports et les différences, et même d'expliquer, s'il se peut, le mécanisme interne de leur structure ; de réduire, en un mot, la Cristallographie à une Science qui ait des principes fixes.* »

À la même époque, le Suédois Torbern Bergman, pour qui Romé de l'Isle est un « *faiseur de catalogue* », s'affiche en soutien de Haüy. En réalité, Bergman a devancé Haüy dans la théorie de la structure des cristaux : en 1773, un de ses élèves a montré qu'en brisant un cristal de spath pyramidal, surgit toujours un noyau rhomboïdal. Toutefois, Bergman, trompé par des ressemblances superficielles, confond les angles de la calcite rhomboédrique avec ceux du grenat et du zircon. Haüy démontre que Bergman a tort et, plus précis, montre que les grenats ont un noyau octaédrique, la calcite un noyau rhomboédrique, le sel marin un noyau cubique, etc. Quoi qu'il en soit, c'est dans ces années-là, dans le dialogue parfois animé entre Romé de l'Isle, Bergman et Haüy, que naît la science cristallographique. Une science à la frontière des mathématiques, de la physique et des sciences naturelles qui n'a nullement détruit la fascination exercée par la beauté et la couleur des gemmes, bien au contraire.

Puis arrive la révolution. L'abbé Haüy, figure un peu lunaire, refuse la constitution civile du clergé et se promène dans Paris en habit religieux. Arrêté en 1792, il fait amener ses cristaux en prison où il continue à travailler – c'est Geoffroy Saint-Hilaire qui l'en sort de justesse peu avant les massacres de septembre.

Calcul des angles des faces. En 1793, il est nommé secrétaire de la commission des poids et mesures, et participe à la définition des étalons de volume et de masse avec Lavoisier. Sous Napoléon, il cumule récompenses et positions (École des mines, Muséum d'histoire naturelle). Avec son *Traité de minéralogie,* publié en 1801, il parvient à l'objectif qu'il s'était fixé : décrire les propriétés de tous les minéraux connus et les classer.

Il devient ainsi le premier à décrire ce qu'est un cristal : un assortiment de molécules intégrantes (un assemblage de molécules semblables) juxtaposées, depuis le centre jusqu'à la surface, soit un édifice périodique formé par la répétition d'une maille élémentaire sur les nœuds d'un réseau. En 1802, il montre comment la géométrie permet de prévoir les formes secondaires, une fois la molécule intégrante (maille élémentaire) et le parallélépipède de base déterminés. C'est la fameuse loi des troncatures rationnelles : deux faces d'un cristal interceptent, sur des arêtes quelconques, des longueurs qui sont entre elles comme des nombres entiers généralement petits (les faces naturelles des cristaux sont parallèles aux familles de plans réticulaires du réseau cristallin) ; Haüy a fait le calcul des angles des faces dans un nombre prodigieux de cas et a vérifié ses prédictions sur des cristaux réels. De ses travaux résultent également des conséquences simples et jusqu'alors incomprises, telle l'impossibilité d'un cristal pentagonal.

À la demande de Bonaparte, René Just Haüy a aussi rédigé un traité de physique qui sera utilisé pendant cinquante ans.

MUSEUM NATIONAL D'HISTOIRE NATURELLE, DISTR.RMN-GRAND-PALAIS/IMAGE BIBL. CENTRALE-MNHN

En 1803, Bonaparte lui demande un traité de physique pour ses lycées, qui sera utilisé jusqu'en 1855. Une pension de 6 000 francs lui est allouée mais elle sera supprimée progressivement lors de la première et de la seconde Restauration, tout comme sa Légion d'honneur accordée en 1802. Haüy meurt en 1822 dans la pauvreté, après avoir refusé de vendre sa collection de 12 000 minéraux aux souverains de Prusse et de Russie. De 1784 à sa mort, Haüy aura publié plus de cent articles et ouvrages sur les cristaux, dont un *Traité de cristallographie* l'année de sa disparition. ■

Pour en savoir plus

› G. Cuvier, « Éloge historique de Haüy », *Recueil des éloges historiques,* Paris, 1861, p. 262-264.

› B. Maitte, « René-Just Haüy (1743-1822) et la naissance de la cristallographie », Travaux du Comité français d'histoire de la géologie, troisième série, t. XV, 2001.

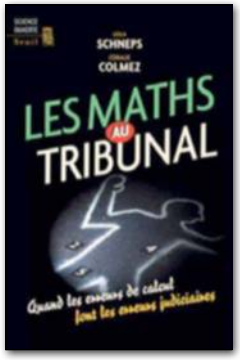
› L. Touret, « Jean-Baptiste Louis de Romé de l'Isle (1736-1790) : des geôles britanniques aux salons parisiens », Travaux du Comité français d'histoire de la géologie, troisième série, t. XI, 1997.

le livre du mois

Les Maths au tribunal

de Leila Schneps et Coralie Colmez

Auriez-vous pu être condamnée à une peine de prison simplement parce que vous êtes blonde avec une queue-de-cheval, que votre petit ami est noir, moustachu et barbu, et qu'il conduit une voiture jaune dans le Los Angeles des années 1960 ? C'est bien ce qui arriva à Janet Collins en 1964, le procureur se prévalant d'une méthode entièrement nouvelle dans les annales judiciaires : le calcul des probabilités. Et en effet, posséder une voiture jaune est inhabituel, être blonde avec une queue-de-cheval pas si fréquent, avoir un petit ami noir, qui plus est barbu et moustachu, rarissime à l'époque. Par une impeccable démonstration mathématique, le procureur annonça une probabilité de 1/12 000 000 qu'il puisse y avoir deux femmes réunissant ces critères. Argument d'autorité mathématique : la coupable du vol à la tire du sac de Mme Brooks devait être Janet Collins, qui passa donc un an en prison. En 1968, la Cour suprême de Californie (People v. Collins, 68 Cal. 2d 319 - Cal: Supreme Court 1968), en jugea autrement, remarquant dans ses attendus que *« les mathématiques, véritables sorciers de nos sociétés informatisées, peuvent aider le juge dans sa recherche de la vérité, mais ne doivent pas jeter un sort contre lui »*.



Sous-titre : Quand les erreurs de calcul font les erreurs judiciaires, Seuil, 2015, 304 p., 20 €.

Cette histoire est racontée avec talent dans ce livre qui tient du polar et de l'ouvrage de vulgarisation mathématique. Comme les neuf autres qui relatent toutes des affaires judiciaires, parfois célèbres, où les statistiques et les probabilités ont joué un rôle essentiel. L'ouvrage incite aussi à une réflexion qui n'est pas anodine pour nous autres scientifiques, lorsque nos disciplines confèrent une légitimité à des décisions douteuses, comme ici dans le domaine judiciaire. Bref, lorsque la science se transforme en sorcière.

Ainsi, l'une des affaires exposées aborde la discrimination de genre dans les carrières universitaires en général, scientifiques en particulier, à travers une crise qui affecta l'université de Californie à Berkeley. En 1986, la titularisation de la mathématicienne Jenny Harrison lui fut refusée ; elle intenta alors une action en justice contre son université. Au terme de sept années de combat, elle finit par obtenir sa titularisation comme professeur. L'affaire intervenait peu après le lancement d'une vaste enquête interne de l'université sur ses pratiques en matière d'égalité hommes-femmes dans le recrutement d'étudiants dans ses cursus de doctorat. Comment mesurer la discrimination ? À défaut de pouvoir sonder les âmes de ceux qui prennent les décisions, on peut mesurer l'écart entre le nombre attendu de femmes acceptées et leur nombre réel sous l'hypothèse d'une égalité de qualité des dossiers.

Discrimination invisible. L'enquête mit en évidence le paradoxe de Simpson, bien connu en statistiques. Toutes disciplines confondues, la discrimination paraissait évidente : 44 % des candidats étaient admis contre 34 % des candidates ; la différence étant significative dans seulement six départements sur un total de quatre-vingt-cinq. La commission d'enquête se pencha sur ces six départements, et eut la surprise de constater que dans quatre d'entre eux, le pourcentage d'admission était meilleur pour les femmes que pour les hommes, et que dans les deux autres, le pourcentage de femmes n'était pas très loin de celui des hommes. Bref, il n'y avait aucune discrimination !

La question est d'actualité en France après l'annonce en juillet dernier des résultats aux concours d'entrée de nos écoles les plus prestigieuses : à l'École normale supérieure de la rue d'Ulm, sur les 40 reçus en liste principale en mathématiques, il n'y a qu'une seule femme ; en informatique, une sur 11 ; à Polytechnique, au concours mathématiques-physique-informatique, 11 sur 102. Pas plus qu'à Berkeley, on ne peut mettre en évidence de discrimination chez les examinateurs. En revanche, le déséquilibre est bien là, on ne progresse plus ; il est grand temps de se saisir sérieusement de ce sujet.

Le livre ne donne pas toujours le détail des raisonnements mathématiques, et on pourrait le regretter. Mais il pose bien les problèmes et il suscite l'envie de comprendre. N'est-ce pas l'essentiel pour un livre de vulgarisation ?

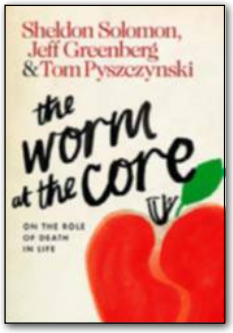
PAR **Martin Andler,** professeur de mathématiques à l'université de Versailles Saint-Quentin-en-Yvelines et président de l'association Animath.

lu d'ailleurs

The Worm at the Core

Sheldon Solomon, Jeff Greenberg et Tom Pyszczynski

Selon la théorie de la gestion de la terreur exposée dans cet ouvrage par trois psychologues, l'être humain, parce qu'il est intelligent, est conscient de sa mortalité tout en étant doté des mécanismes biologiques naturels de survie ; il a la capacité à ressentir la terreur, c'est-à-dire la peur de la mort. La gestion de cette terreur aurait permis l'émergence de la religion, de l'art, de la culture, de la science. Elle agit en filigrane de notre existence, en influençant presque tous ses aspects. Ce serait elle qui, inconsciemment, nous incite à défendre nos valeurs, à mener des guerres contre ceux qui les menacent. Elle aurait érigé les pyramides d'Égypte, motivé les attaques contre le World Trade Center, alimenterait l'homophobie et le racisme. Au jour le jour, c'est la gestion de ce ver au cœur de notre humanité, qui parfois nous incite à être vertueux ou qui nous pousse au vice, à consommer à outrance, à trop boire, trop manger, à rechercher la célébrité. Nous nous accrochons aux symboles, aux institutions et aux valeurs de notre société pour nous distraire de cette fatalité, car ceux-ci nous offrent une illusion d'ordre, de sens et de permanence, alors que nous sommes en tout temps *« sur le point de réaliser que notre existence est précaire »*. Aussi, nous contribuons à cette société et fortifions notre estime de soi pour nous forger une part d'immortalité.



Sous-titre : on the Role of Death in Life, Random House, 2015, 288 p., 28 $.

Pour vérifier cette hypothèse, les auteurs ont enquêté sur *« l'influence de la mort sur la vie humaine »* et relevé plus de 500 recherches en psychologie expérimentale sur le sujet. Ils rapportent notamment une étude menée sur 22 juges en Arizona. Lorsque, peu avant de rendre leur verdict, ces juges étaient contraints à réfléchir sur leur mort, les accusés ont été punis plus sévèrement. Selon les auteurs, *« les résultats montrent que les juges, confrontés à leur mortalité, ont réagi en tentant de faire ce qui était prescrit par leur culture »* en favorisant une véritable punition. Le rappel de la mort nous pousserait à punir ceux qui remettent en question les valeurs de notre culture, et à encourager ceux qui la renforcent. Ainsi, dans une autre étude, les sujets, confrontés à leur mortalité, choisissent de récompenser trois fois plus les délateurs de criminels.

Les expériences présentées et les éléments anthropologiques, philosophiques et historiques rapportés soulèvent de profondes interrogations sur notre relation à la mort, à notre estime de soi, à nos pulsions et notre culture. Mais l'interprétation des auteurs de ces arguments est parfois peu probante, et les conclusions qu'ils en tirent semblent souvent hâtives. Si bien que certains lecteurs termineront l'ouvrage sans être convaincus de cette théorie ou que la racine de toute cruauté humaine germe de *« l'intolérance fondamentale à ceux qui ne partagent pas le même point de vue culturel »*. *The Worm at the Core* souligne cependant avec raison qu'il fut une époque où la mort était au cœur de toutes les préoccupations humaines et philosophiques, et met en lumière le manque de réflexion sur la mort en psychologie dans notre société contemporaine.

■ **Binh An Vu Van, journaliste scientifique à Montréal.**

à signaler

Physique

Électrocuter un cornichon

Florian Briant

Belin, 2015, 176 p., 19,90 €.

Un énième livre pour rendre la science amusante ? Pas seulement. Cet ouvrage, écrit par un professeur de sciences physiques, fait certes la part belle aux expériences ludiques (classées par niveau de difficulté et de danger). Mais il pose aussi des énigmes plus académiques. Il offre un éclairage simple sur quinze grandes thématiques de la physique (viscosité, fluorescence…).

Démographie

Comment vivrons-nous demain en ville ?

Gilles Antier

Le Pommier, 2015, 128 p., 7,90 €.

En 2020, les habitants de la planète seront plus nombreux dans les

villes que dans les campagnes. Et déjà, un milliard d'êtres humains vivent dans les 150 plus grandes villes du monde. Accès à l'eau ou aux transports, gestion des déchets, pollution seront des questions d'autant plus épineuses, *a fortiori* dans les pays en voie de développement. D'où l'urgence de penser la ville de demain, que la science rendra possible : durable, intelligente, partagée, résiliente. Cet ouvrage ouvre des perspectives.

Biologie

La Mémoire et la Folie

Stanley B. Prusiner

Odile Jacob, 2015, 374 p., 29,90 €.

Stanley Prusiner est le découvreur du prion, l'agent infectieux responsable de maladies neurodégénératives, comme la maladie de Creutzfeldt-Jakob, la tremblante du mouton ou la maladie de la vache folle. Dans cette autobiographie, il relate ses travaux qui lui ont permis de découvrir le responsable de ces maladies : le prion, protéine exempte de matériel génétique comme support de l'information infectieuse. Cette découverte a remis en question le paradigme selon lequel il n'existe que trois agents infectieux (virus, bactéries et parasites). Elle a valu à Prusiner de recevoir le prix Nobel de médecine en 1997.

Médecine

Le Charme discret de l'intestin

Giulia Enders

Actes Sud, 2015, 350 p., 21,80 €.

L'intestin est un organe fascinant ! Giulia Enders, doctorante en médecine, en fait la démonstration dans ce livre plein d'humour et d'érudition. Avec 200 millions de neurones, 100 000 milliards de micro-organismes, et une surface cent fois supérieure à celle de la peau, l'intestin constitue un immense territoire aux fonctions encore méconnues. L'auteur nous dresse un état des lieux et lève le voile sur les récentes découvertes.

Économie numérique

À qui profite le clic ?

Valérie-Laure Benabou et Judith Rochfeld

Odile Jacob, 2015, 112 p., 17,90 €.

L'internaute n'est pas un simple consommateur, il est aussi contributeur. Les moindres clics et contenus laissés sur la Toile constituent la matière première de l'économie numérique. Or, ce sont essentiellement les géants du Web qui en bénéficient. Les deux auteurs proposent des solutions juridiques pour remédier à ce déséquilibre.

Astronomie

À la poursuite des ondes gravitationnelles

Pierre Binétruy

Dunod, 256 p., 2015, 19 €.

« L'essentiel est invisible pour les yeux », écrivait Antoine de Saint-Exupéry. Et c'est justement le cas des ondes gravitationnelles, des déformations de l'espace-temps, jamais détectées directement, mais dont Einstein avait prédit l'existence il y a un siècle. L'auteur esquisse ici une histoire de la gravitation et imagine une astronomie où ces ondes nous permettraient d'accéder à une nouvelle facette de l'Univers.

Environnement

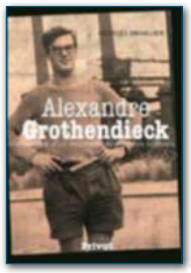
Le Climat, à quel prix ?

Christian de Perthuis et Raphaël Trotignon

Odile Jacob, 2015, 152 p., 19,90 €.

À quelques mois de la conférence de l'ONU sur le climat, Christian de Perthuis et Raphaël Trotignon, respectivement fondateur et membre de la chaire d'économie du climat à l'université Paris-Dauphine, donnent les clés de la négociation climatique. Ils livrent aussi un plaidoyer pour une tarification internationale du carbone.

Mathématiques



Alexandre Grothendieck

Georges Bringuier

Éditions Privat, 2015, 227 p., 18 €.

Première biographie en français d'Alexandre Grothendieck, ce livre évoque l'itinéraire de ce mathématicien disparu fin 2014. Regorgeant d'anecdotes, l'ouvrage permet d'appréhender cet esprit tourmenté qui a vécu coupé du monde pendant plusieurs décennies. La partie mathématique est toutefois à peine esquissée, de sorte qu'on perçoit mieux son caractère excentrique que son génie.

Physique

Vous avez dit physique ?

Kamil Fadel

Dunod, 2015, 160 p., 14,90 €.

Si vous ne pouvez pas vous rendre au palais de la ›››

Les livres

›››› Découverte, laissez-le venir à vous ! Au fil des pages, le médiateur scientifique Kamil Fadel explique les concepts fondamentaux de la physique sans formule ni jargon. Grâce à des exemples concrets tirés du quotidien et au travers d'expériences à réaliser chez soi, il met les sciences physiques à la portée de tous.

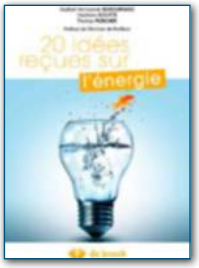
BEAU LIVRE

Demain les animaux du futur

À quoi pourrait ressembler la vie sur notre planète dans dix millions d'années ? C'est en partant de cette question incongrue au premier abord que le paléontologue Sébastien Steyer et le sculpteur numérique Marc Boulay ont travaillé pendant quatre ans pour arriver à cet ouvrage magnifique. Dans ce monde imaginaire – personne ne peut prédire le futur –, mais fondé sur nos connaissances en sciences de l'évolution, on rencontre notamment des représentations 3D d'un têtard géant des profondeurs, d'une scolopendre volante au poison mortel ou d'un colibri qui a perdu la capacité de voler mais auquel il reste quelques plumes sur le crâne (en bas sur la couverture). La flore se sera également transformée, des paysages de mangroves alternant avec des prairies sur des continents qui, eux, n'auront pas énormément bougé : dix millions d'années, c'est court à l'échelle de la tectonique. Quant à l'animal que nous sommes, il aura très certainement disparu…

Marc Boulay et Sébastien Steyer, Belin, 2015, 144 p., 23 €.

Développement durable



20 idées reçues sur l'énergie

Raphaël Homayoun Boroumand, Stéphane Goutte, Thomas Porcher

De Boeck, 2015, 208 p., 18 €.

Pédagogues et rigoureux, les auteurs de cet ouvrage déconstruisent 20 idées reçues sur l'énergie. En intégrant à leur réflexion les chiffres, les publications scientifiques et les lois les plus récents, ils proposent des pistes pour mettre en place une politique énergétique adaptée aux enjeux climatiques et aux spécificités du XXIe siècle.

Histoire des sciences

Le Collège de France

Antoine Compagnon, Pierre Corvol, John Scheid

Gallimard/Collège de France, 2015, 176 p., 26 €.

Dans cet ouvrage richement illustré, trois professeurs du Collège de France dressent un portrait historique de l'institution. Depuis sa création difficile en 1530 jusqu'à nos jours, le Collège de France est resté un espace de liberté à la pointe de la connaissance, porté par des figures emblématiques comme le chimiste Marcelin Berthelot, le poète Paul Valéry, le philosophe Michel Foucault ou encore le physicien Paul Langevin.

Culture

L'Art de l'univers

John D. Barrow

Actes Sud, 2015, 480 p., 30 €.

Sortant de son registre habituel de cosmologiste, l'américain John Barrow explore ici le rapport entre science et art. Plusieurs domaines sont examinés : l'évolution, l'astronomie, les sons, etc. En évoquant des ponts inattendus entre art et science, l'auteur parvient à nous faire saisir comment la complexité des sciences a pu inspirer nos cultures. Un livre qui n'est pas sans évoquer le *Gödel, Escher, Bach* de Douglas Hofstadter (Pulitzer 1979).

Neurosciences

Peut-on manipuler notre cerveau ?

Christian Marendaz

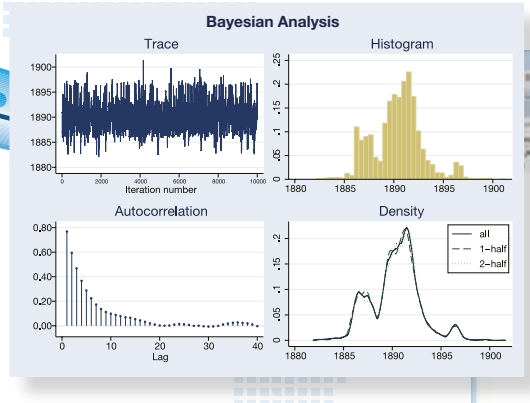
Le Pommier, 2015, 128 p., 7,90 €.

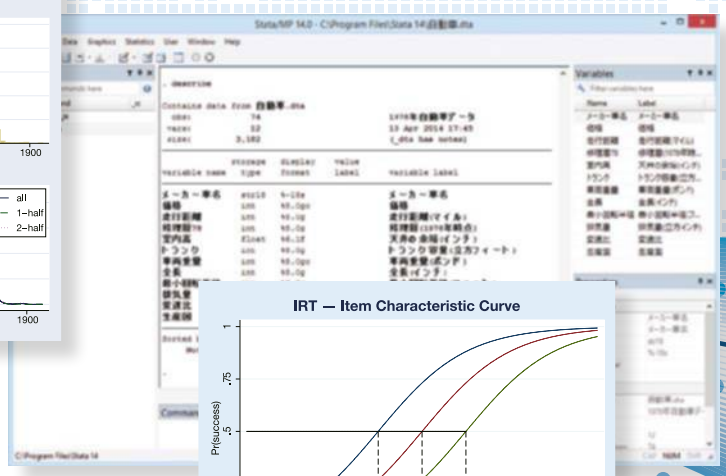
À la question qui constitue le titre de cet ouvrage, son auteur, professeur de neuropsychologie cognitive au CNRS, répond sans détour : oui, le cerveau peut être manipulé. Il réagit avec succès aux expériences de chercheurs qui s'appuient sur la stimulation transcrânienne, l'interface cerveau-machine ou la méditation. Ce qui permet l'élaboration de thérapies permettant par exemple de lutter contre les troubles psychiatriques ou d'améliorer les aptitudes mentales. Synthétique et accessible, ce livre déplace la question sur le terrain éthique : si elle est possible, la manipulation est-elle souhaitable ?

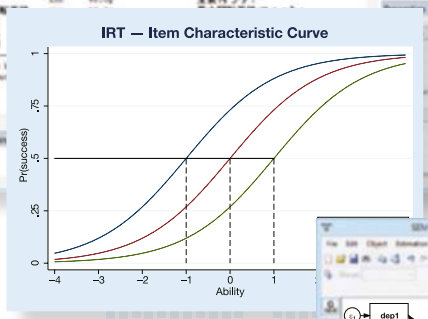
Et aussi :

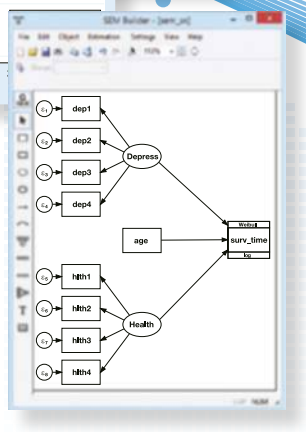
L'Oncologie : de l'empirisme à la biologie intégrée
Hugues de Thé, Collège de France / Fayard, 2015, 80 p., 10,20 €.

Stata® 14 release









- Analyse Bayésienne
- Modèles de survie multi-niveaux et données de panel
- Effets de traitement endogène
- IRT (estimation des paramètres d'item et de sujet)
- Modèles multi-niveaux pour les données de survey
- Modèles Markov-switching
- Unicode
- Et bien plus encore...

STATISTIQUE

GRAPHIQUES

GESTION DE DONNÉES

www.ritme.com

RITME - 34 bd Haussmann
75009 Paris - France
Tél. : +33 (0)1 42 46 00 42

RITME SCIENTIFIC SOLUTIONS

Distributeur officiel en France, Suisse, Belgique et au Luxembourg

© 2015 RITME. Stata est une marque déposée de StataCorp. Toutes les marques déposées sont la propriété de leurs sociétés respectives.

Agenda

Les 28 août, 4 et 11 septembre, 17 h

Les fouilles archéologiques d'Ormesson

Visite. Le site paléolithique des Bossats, en Seine-et-Marne, fait l'objet de fouilles archéologiques depuis 2009. Celles-ci ont révélé des vestiges majeurs sur les dernières populations néandertaliennes et les premiers groupes d'*Homo sapiens* dans le Bassin parisien. Pierre Bodu, responsable des fouilles, fait visiter ce chantier.

Ormesson (Seine-et-Marne), chantier de fouilles, route de la vallée. www.musee-prehistoire-idf.fr

Le 8 septembre, 19 h 30

Einstein et la relativité générale

Conférence. Après avoir raconté l'élaboration de la théorie de la relativité générale par Einstein, l'historienne des sciences Françoise Balibar passe en revue les trois tests suggérés par le physicien pour mettre sa théorie à l'épreuve. Elle compare l'importance accordée par Einstein aux données expérimentales par rapport aux développements mathématiques.

Paris, Institut d'astrophysique. http://tinyurl.com/einstein-relativite

Le 9 septembre, 19 h 30

Les tortues marines de l'outre-mer français

Conférence. L'outre-mer français abrite six espèces de tortues marines. Comment vivent-elles ? La vétérinaire Cécile Gaspar et le biologiste Jérôme Bourjea dévoilent les mystères qui entourent ces grands migrateurs et expliquent comment la science se met au service de leur préservation.

Paris, Maison des océans. http://tinyurl.com/tortues-marines

Le 10 septembre, 18 h

Stress, pollution, tabac : les ennemis de notre santé

Conférence. Les radicaux libres participent au renouvellement de nos cellules. Mais, à cause du tabac, de la pollution ou du stress, notre organisme en produit trop. Cela engendre un vieillissement prématuré, explique Alice Carrier, du Centre de recherche en cancérologie de Marseille, avant d'évoquer les moyens d'y remédier.

Marseille, CNRS. www.provence-corse.cnrs.fr/-Les-Jeudis-du-CNRS

Le 15 septembre, 20 h 30

Quand notre voix s'exprime

Conférence. La voix est au cœur des interactions sociales humaines. Elle reflète nos émotions, nos humeurs, notre personnalité, elle est un outil de travail ou un instrument de musique. Nathalie Henrich Bernardoni étudie son fonctionnement : elle montre ici l'étendue de nos capacités vocales en jouant en direct de cet instrument fabuleux.

Rennes (Ille-et-Vilaine), Espace des sciences. www.espace-sciences.org/conferences/rubrique

Le 17 septembre, 18 h

Les techniques de chasse et de pêche

Conférence. Pour nos ancêtres de la Préhistoire, la recherche de nourriture était une activité primordiale. La préhistorienne Patricia Valensi fait le point sur la façon dont cette pratique a évolué au cours du Paléolithique, du charognage aux techniques permettant de chasser et pêcher.

Nice (Alpes-Maritimes), Musée d'archéologie, site de Terra Amata. http://tinyurl.com/chasse-peche

Les 19 et 20 septembre

Journées du patrimoine

Visites. Dans toute la France, de nombreux sites ouvrent exceptionnellement leurs portes au public, dont l'Institut de paléontologie de Paris ou la faculté de médecine de Marseille. Des animations sur des sujets scientifiques sont proposées, parmi lesquelles une exposition retraçant l'histoire de l'informatique à l'Institut supérieur d'informatique, à Aubière (Rhône), des conférences sur l'astronomie à l'Observatoire de Lyon…

Dans toute la France. www.journeesdupatrimoine.fr

Du 21 septembre au 8 décembre

Les sciences au cinéma

Projections. Découvrez sur grand écran une sélection de très courts métrages scientifiques, produits notamment par le CNRS. La santé, l'environnement, les sciences participatives, l'astronomie, les mathématiques, ou encore l'acoustique sont au programme. Vient ensuite le documentaire « Le ventre, notre deuxième cerveau ».

Dans huit villes du Lot. http://tinyurl.com/science-cinema

Jusqu'au 20 septembre

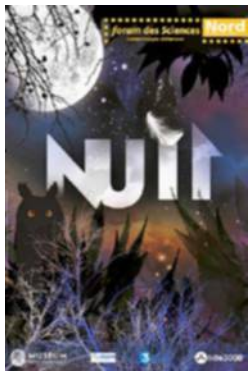
Empreintes, instantanés de vie

Exposition. Connaissez-vous l'ichnologie ? Cette branche de l'archéologie, qui étudie les empreintes fossilisées, est à l'honneur dans cette exposition. Les empreintes sont les seuls vestiges que nous ayons du corps, des pieds et des mains des hommes et des animaux de la Préhistoire : découvrez ces contours essentiels pour comprendre notre passé.

La Chapelle-aux-Saints (Corrèze), musée de l'homme de Neandertal. http://tinyurl.com/empreintes-vie

à ne pas manquer

Nuit



Que se passe-t-il durant la nuit, dans le ciel et dans la nature ? Pour répondre à cette question, l'exposition convoque l'astronomie, la biologie, l'éthologie, la physiologie, l'anthropologie et la neurologie. Le visiteur est d'abord invité à lever les yeux vers le ciel pour observer la Lune ou les étoiles, ou à découvrir des éclats de météorites. La seconde partie de l'exposition est consacrée à la faune : comment les animaux s'adaptent-ils à la vie nocturne ? Quels sens ont-ils développés ? La dernière partie explore le sommeil : quel est son rôle ? Comment dorment les animaux ? Rêvent-ils comme les humains ? L'exposition tous publics présente notamment des spécimens d'animaux et de nombreux dispositifs interactifs.

Jusqu'au 6 mars 2016, au Forum des sciences, Villeneuve d'Ascq (Nord). www.forumdepartementaldessciences.fr/exposition-grand/nuit

Anniversaire

> LE 25 SEPTEMBRE, la Nuit européenne des chercheurs fête ses 10 ans. À cette occasion, douze villes accueillent une grande expérience participative : en jouant avec les règles de l'économie, les visiteurs aident les chercheurs à récolter des données pour mieux comprendre la réalité. Puis des volontaires devront gérer différentes ressources collectives et faire des choix stratégiques. Comment décider d'utiliser ces biens ? Qui en sera bénéficiaire ? Quels seront les effets sur le collectif et sur les générations futures ? En plus de cette expérience, vous pouvez comme chaque année dialoguer avec des chercheurs de toutes disciplines, au cours de démonstrations ou de conférences organisées à Albi, Angers, Besançon, Bordeaux, Brest, Dijon, Le Mans, Limoges, Lyon, Metz, Paris et Toulouse.

> www.nuitdeschercheurs-france.eu

Jusqu'au 21 septembre

Des dieux et des hommes

EXPOSITION. La religion est omniprésente dans la vie quotidienne durant l'Antiquité gallo-romaine. Cette exposition met en avant des découvertes archéologiques récentes : offrandes, statuettes et ex-voto, issus de nombreux sanctuaires fouillés dans la Sarthe et la Mayenne. Elle montre également le rôle social de la religion et ses liens avec le pouvoir politique.

Le Mans (Sarthe), Carré Plantagenêt. http://tinyurl.com/dieux-hommes

Le 24 septembre, 18 h 30

Manger dans l'espace

CONFÉRENCE. La nourriture est un des facteurs qui influent le plus sur la santé physique et morale des astronautes. Mais les besoins sont-ils les mêmes sur Terre et dans l'espace ? Que nous a appris le vol habité ? Alain Maillet et Stéphane Blanc, chercheurs en physiologie, et Lionel Suchet, directeur adjoint du Centre spatial de Toulouse, répondent à ces questions.

Toulouse (Haute-Garonne), Cité de l'espace. http://tinyurl.com/manger-espace

Les 26 et 27 septembre

Rencontres archéologiques de Saint-Céré

FESTIVAL. Le samedi, une série de conférences aborde les fouilles et découvertes archéologiques en Aquitaine et Midi-Pyrénées, ainsi que les mutations du monde celtique à la fin de l'âge du fer. Le lendemain, des visites de trois sites archéologiques du département du Lot sont proposées, en compagnie de chercheurs en préhistoire, anthropologie ou archéologie.

Saint-Céré (Lot), auditorium. http://tinyurl.com/rencontres-archeologiques

Jusqu'au 27 septembre

Des hommes et des plantes qui soignent

EXPOSITION. Depuis les plus anciennes civilisations, les sociétés ont puisé dans la nature des ressources pour se soigner. À l'aide de dispositifs sonores, olfactifs ou interactifs, l'exposition relate l'histoire des plantes médicinales à travers le temps et les sociétés, où science, religion, médecine, botanique et magie se mêlent parfois.

Ploëzal (Côtes-d'Armor), domaine départemental de la Roche Jagu. http://tinyurl.com/hommes-plantes

Jusqu'au 30 septembre

Destination comètes

EXPOSITION. L'objectif de cette exposition interactive, conçue avec le Laboratoire d'astrophysique de Marseille, est de faire découvrir les comètes, leurs origines et leur constitution, à partir d'observations anciennes et récentes. La mission Rosetta y est présentée, avec ses premiers résultats sur la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko.

Marseille, observatoire. http://andromede.id.st/exposition-actuelle-p604509

Du 30 septembre au 3 octobre

Rencontres du film d'archéologie du Grand Narbonne

FESTIVAL. Cette troisième édition du festival parcourt toutes les périodes archéologiques. À l'issue des projections, le public pourra échanger avec des réalisateurs et des scientifiques. Les soirées sont consacrées aux conférences portant sur la période gauloise. Un programme est également proposé au jeune public en matinée.

Narbonne (Aude), médiathèque du Grand Narbonne. http://tinyurl.com/film-archeologie

Le mois prochain dans La Recherche

Dossier
À la recherche de nouvelles terres
Près de 2 000 planètes ont été découvertes en dehors du système solaire. Quelles sont leurs caractéristiques ? Peuvent-elles abriter la vie ? Comment analyse-t-on leur atmosphère ?

Spécial COP21
Quel avenir pour les glaciers ?

Abeilles
De moins en moins de spécialistes pour les étudier

N° 504 • EN VENTE LE 24 SEPTEMBRE

Baiser surestimé

« Les amoureux qui se bécotent sur les bancs publics », fredonnait Brassens, capturant le temps d'une chanson une pratique universelle. Mais le baiser est-il aussi répandu qu'on le croit ? Des anthropologues américains ont étudié la question à partir d'informations sur 168 cultures différentes recueillies auprès d'ethnologues et d'une base de données anthropologique mondiale. Ils sont parvenus à la conclusion que le baiser « romantico-sexuel », défini comme un contact lèvre à lèvre prolongé ou non, et excluant les baisers échangés entre parents et enfants, n'est présent que dans 46 % des cultures étudiées. En particulier, les populations du Moyen-Orient et d'Amérique centrale ne se bécotent pas du tout, du moins en public. Selon les auteurs, l'universalité présumée et surestimée du baiser s'explique par un « ethnocentrisme occidental ». N'en déplaise aux amateurs de baisers hollywoodiens.

SHUTTERSTOCK/SOLOMINVIKTOR

http://tinyurl.com/baiser-universel

Testostérone et banqueroute

Un trop-plein de testostérone déstabiliserait-il le marché financier ? Oui, selon une étude menée auprès d'une centaine de volontaires dont le taux d'hormone était contrôlé par des prélèvements de salive. Ils devaient jouer à un jeu de trading. Puis 75 jeunes hommes devaient ingérer à l'aveugle de la testostérone, du cortisol – une autre hormone – ou un placebo, avant de reprendre le jeu. Résultat : un haut niveau de cortisol accroît la prise de risque, tandis qu'un taux de testostérone élevé exacerbe l'optimisme des volontaires. De quoi favoriser des investissements risqués chez les traders.

http://tinyurl.com/hormone-finances

Les primates, amateurs d'alcool

GAKU OHASHI, CHUBU UNIV./WILDLIFE RESEARCH CENTER, KYOTO.

La boisson n'est pas une passion exclusivement humaine. Pour la première fois, des primatologues ont mis en évidence une consommation régulière d'alcool chez des chimpanzés en liberté. Grâce à des vidéos prises entre 1995 et 2012 aux abords du village de Bossou, en Guinée, ils ont apporté la preuve que les chimpanzés s'abreuvent régulièrement de l'éthanol produit par la fermentation de la sève de palmier, qui sert à faire du vin de palme. Les primates le récupèrent dans des contenants installés par les villageois à l'aide de feuilles mâchées qu'ils utilisent comme des éponges. Pour boire, ils plongent cet outil rudimentaire dans la sève fermentée puis le croquent. Ils consomment ainsi un litre de boisson en moyenne, avec un taux d'alcool moyen de 3 %. Après avoir étanché leur soif, la plupart s'écroulent et s'endorment rapidement. http://tinyurl.com/chimpanzes-ethanol

Petit mais rusé

L'Acanthize mignon, un des plus petits oiseaux d'Australie, est un grand imitateur. Pour protéger sa progéniture, il simule la présence d'un faucon en reproduisant le cri d'alerte d'autres espèces d'oiseaux. Il exploite le fait que ses prédateurs savent interpréter ces cris pour mieux les tromper. Après avoir enregistré les performances vocales dudit volatile, des biologistes australiens ont testé l'efficacité de ses imitations sur le Grand Réveilleur, un oiseau qui se délecte des oisillons de l'Acanthize. Dès qu'il s'approchait du nid, les chercheurs diffusaient la bande sonore. Résultat : pendant plusieurs secondes, le prédateur détournait son attention de ses proies, scrutait le ciel, persuadé de la présence d'un faucon. De quoi laisser le temps aux oisillons de sauver leurs plumes.

http://tinyurl.com/oiseau-imitateur

JEUDI 22 OCTOBRE 2015 À 19H
MUSÉE DU QUAI BRANLY

LE PRIX La Recherche

LA SCIENCE EN AVANCE

12e ÉDITION

RENSEIGNEMENTS & INSCRIPTIONS
www.leprixlarecherche.com

EN PARTENARIAT AVEC

DUNOD

RENAULT
La vie, avec passion

RITME
SCIENTIFIC SOLUTIONS

AVEC LE SOUTIEN DE

arte FUTURE

L'OBS

Avec plus d'1 million de Sociétaires, on peut déplacer des montagnes

Quand une banque tire sa force de l'esprit coopératif, elle s'appuie sur des valeurs de solidarité, d'écoute et de confiance. Créée par des enseignants, la CASDEN s'engage ainsi auprès de plus d'un million de Sociétaires à réinvestir leur épargne dans le financement des projets de chacun.

Rejoignez-nous sur **casden.fr** *ou contactez-nous au* **01 64 80 64 80***

**Accueil téléphonique ouvert de 8h30 à 18h30 du lundi au vendredi (appel non surtaxé, coût selon opérateur)*

+X BANQUE POPULAIRE

L'offre CASDEN est disponible en Délégations Départementales et également dans le Réseau Banque Populaire.

casden BANQUE POPULAIRE

CASDEN Banque Populaire - Société Anonyme Coopérative de Banque Populaire à capital variable. Siège social : 91 Cours des Roches - 77186 Noisiel. Siret n° 784 275 778 00842 - RCS Meaux. Immatriculation ORIAS n° 07 027 138
BPCE - Société anonyme à directoire et conseil de surveillance au capital de 155 742 320 €. Siège social : 50 avenue Pierre Mendès France - 75201 Paris Cedex 13. RCS PARIS n° 493 455 042. Immatriculation ORIAS n° 08 045 100
BROCA & WERNICKE - Illustration : Killoffer.

CASDEN, la banque coopérative de l'éducation, de la recherche et de la culture